



TITLE:

西南日本における巨大地震による
定量的被害予測とその対応策に関
する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

宝音 図

CITATION:

宝音 図. 西南日本における巨大地震による定量的被害予測とその対応
策に関する研究. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18259>

RIGHT:

西南日本における巨大地震による定量的被害予測 とその対応策に関する研究

2014 年 1 月

宝 音 図

目 次

第 1 章 序論

- 1.1 研究の背景
- 1.2 既往の研究
 - 1.2.1 強震動予測
 - 1.2.2 地震被害予測
 - 1.2.3 環境負荷評価
- 1.3 研究の目的と構成

第 1 章の参考文献

第 2 章 耐震補強の有効性に関する実測的検討

- 2.1 はじめに
- 2.2 研究の背景
- 2.3 対象建物及び耐震補強概要
 - 2.3.1 対象建物
 - 2.3.2 耐震補強概要
- 2.4 耐震補強前後の微動観測による解析結果
 - 2.4.1 常時微動計測の方法
 - 2.4.2 微動観測による解析結果
- 2.5 振動解析モデルを構築及び耐震性評価
 - 2.5.1 解析モデル
 - 2.5.2 耐震性評価
- 2.6 本章のまとめ

第 2 章の参考文献

第 3 章 東北地方太平洋沖地震による強震動と構造物破壊能

- 3.1 はじめに
- 3.2 観測強震動記録及びその特性
- 3.3 観測強震動の構造物破壊能
- 3.4 推定震源モデルによる再現強震動
- 3.5 再現強震動の構造物破壊能
- 3.6 本章のまとめ

第 3 章の参考文献

第 4 章 西南日本における地震活動の特徴と想定震源特性

- 4.1 はじめに

- 4.2 日本の地震活動について
 - 4.3 西南日本における地震活動の特徴
 - 4.3.1 西南日本における太平洋側沖合などのプレート境界付近で発生する地震
 - 4.3.2 西南日本におけるフィリピン海プレートの沈み込みによるプレート間地震
 - 4.3.3 西南日本における沈み込むフィリピン海プレート内の地震
 - 4.3.4 西南日本における陸域の浅い地震（深さ約 20km 以浅）
 - 4.3.5 西南日本における日本海東縁部の地震
 - 4.4 南海トラフ沿いの想定巨大地震の震源特性
- 第4章の参考文献

第5章 西南日本海溝型地震の統計的グリーン関数による広帯域強震動予測

- 5.1 はじめに
 - 5.2 包・川瀬による統計的グリーン関数
 - 5.3 震源断層のモデル化及び解析点
 - 5.4 想定波形の合成方法
 - 5.5 波形合成とその妥当性の検討
 - 5.6 本章のまとめ
- 第5章の参考文献

第6章 西南日本海溝型地震による想定地震動に基づいた建物被害予測

- 6.1 はじめに
 - 6.2 長戸・川瀬による非線形解析モデル群
 - 6.3 入力地震動と建物群の被害予測手法
 - 6.4 西南日本における建物被害予測
 - 6.5 本章のまとめ
- 第6章の参考文献

第7章 西南日本海溝型地震による建物被害予測に基づいた環境負荷予測

- 7.1 はじめに
 - 7.2 中・大破建物による CO₂ 排出量の算定手法
 - 7.3 中・大破建物による廃棄物量の算定手法
 - 7.4 想定南海トラフ沿いの巨大地震における CO₂ 環境負荷と廃棄物量の算定
 - 7.4.1 単独発生の場合
 - 7.4.2 連動型発生の場合
 - 7.5 本章のまとめ
- 第7章の参考文献

第8章 耐震補強を実施した場合や耐震設計レベルを改訂した場合の被害低減度予測

- 8.1 はじめに
- 8.2 耐震設計の問題
- 8.3 耐震性能向上による推定被害率の変化
- 8.4 耐震性能向上による環境負荷の変化
- 8.5 本章のまとめ
- 第8章の参考文献

第9章 結論

- 9.1 本論文のまとめ
- 9.2 今後の課題と展望

発表論文一覧

謝辞

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

1.2 既往の研究

1.2.1 強震動予測

1.2.2 地震被害予測

1.2.3 環境負荷評価

1.3 研究の目的と構成

第 1 章の参考文献

1.1 研究の背景

ここ数年、世界各地で自然災害が増加し、多くの人命と財産が失われており、持続可能な発展の大きな障害となっている。特に、巨大な地震・津波災害は、気象災害や噴火等と異なり科学的な予報・予知が確立されておらず、前触れもなく突然やってくるため、他の自然災害と比べ発生数が少ないにもかかわらず発生死者数が多く、21 世紀以降に世界中の自然災害により死亡した人のうち約 7 割以上を出していることが報告されている^[1-1]。巨大地震が発生すると、その強い地震動により構造物が被害を受け、そこで生活している人々に被害を及ぼす。地震災害に対する脆弱性を減らし、被害を軽減していくことは国際的にも今後研究されるべき重要な課題の一つと考えられる。環太平洋地震帯の一環に位置し、三つのプレートがせめぎ合う最も活発な地殻変動を示している日本列島周辺ではこれまで多数の地震により、その強い揺れや大津波が、建造物を破壊して家財を散乱させ、火災、土砂災害、ライフライン被害、原発事故などを引き起こし、多大な人的被害と経済被害に見舞われてきた。

西南日本地域では、過去の被害記録から、その被害地震のほとんどが南海トラフ沿いの、90～150 年間で繰り返し発生している M8 クラスの巨大な海溝型地震と、その発生前後（約 60 年前から約 10 年後）に続く活動期の間に起こった内陸地震であることが知られている^[1-2, 1-3]。一般的な M8 クラスの海溝型巨大地震は発生する確率が相対的に高く、影響する地域が広域にわたり、強い地震動による建造物の倒壊・地すべり・液状化現象・地盤沈下などの直接的な被害のほか、火災、大津波、交通機関の乱れなど二次被害が生じ、結果として、経済的にも社会的にも全国規模で影響をもたらすという特徴があり、その震源域は日本列島の太平洋側を囲むように分布している。例えば、東南海・南海地震の今後 30 年以内の発生確率は 50%～60%程度^[1-4]と言われており、発生すれば西南日本の震源域に近い太平洋沿岸を中心に、地震の揺れや大津波により広域かつ甚大な被害を与えるものと推定されている。また、いつ起きてもおかしくないといわれてきた東海セグメントも連動して破壊する可能性も高いといわれている。

現在の科学技術では地震の予知を正確に行うことは困難であるが、地震の起こりやすさ（発生確率）や大きさ（マグニチュード）、ある場所での揺れ（震度）は 1995 年兵庫県南部地震以降の研究により、現在はかなり精度よく再現または予測できるようになった^[1-5～1-9]。しかし、建物被害が同精度で予測できないのでは効果的な災害対策は立てられない。よって将来発生するであろうこれらの想定地震における建築物被害を定量的に予測することが重要である、そのためには地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をするべきである^[1-10, 1-11]。その観点から 1995 年兵庫県南部地震以降、内陸地震については、観測強震動および実被害データに基づいて、過去の被害地震の地震動の再現や起こりうる地震の強震動予測^[1-12～1-15]および構造物被害予測モデル^[1-16～1-19]を構築し、それを応用してシナリオ地震被害予測を行う努力がなされてきた^[1-20～1-22]。その結果、ある場所の過去の歴史地震や地震観測記録、地盤や実建物の特性等を解析してその地域の地震災害予測をし、被害を最低限度に抑えて、経済的にも被害を減らし、震災に備えることが可能となった。しかし、巨大な海溝型地震の強震動を予測する上ではやや長周期域成分を多く含む強震動における地盤増幅をどう定量的に評価するかなどいろいろな問題が残されている。さらに、構造物の被害予測モデルの検証およびそれに基づいた被害軽減対策の構築という、極めて重要な要素技術において未だそれらが定量的に評価可能となっているとは言い難い状態である。

こうした状況下において、平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分に、日本の太平洋三陸沖中部から茨城県沖に渡る広い領域を震源とした超巨大地震である東北地方太平洋沖地震（M9.0）が発生した。この地震に

より、1 万 8 千人を超える死者・行方不明者が生じ、東日本の太平洋沿岸を中心に壊滅的な津波被害がもたらされた。しかしながら津波被害を免れた地域での被害調査では、非常に大きな加速度が記録されたにも関わらず、揺れによる大きな建物被害は少なかったことが報告されている^[1-23]。そのため震害に伴って生じた死者数も 100 人程度と推定されている。地震による構造物の大破、倒壊といった大被害は、構造物に作用する揺れ方(地震動)と構造物が耐えられる耐力(耐震性能)との相対関係によって決まる^[1-24]。今回のような予想外に軽微であった建物被害の生成原因を観測強震動の特性と建物の応答特性を考慮した建物被害調査によって明らかにすることは、近未来に発生することが確実になっている南海トラフ沿いの巨大な海溝型地震による都市防災対策上極めて重要である。

南海トラフ沿いで 2011 年東北地方太平洋沖地震のような規模の巨大地震が発生すれば、現状では震源域における西南日本を中心に、東日本大震災を超える甚大な物的被害・人的被害が発生し、我が国全体の国民生活・経済活動に極めて深刻な影響をもたらす巨大な災害になる可能性が高い。実際に内閣府^[1-25]は 2012 年 3 月に、南海トラフの巨大地震の震源域と規模をそれぞれ 2003 年公表時の 2 倍・3 倍にし、各地の震度分布・津波波高の想定を公開した。その後 8 月に、再度津波波高の予測を見直すとともに、物的被害、人的被害による被害想定を発表し、最悪 32 万人の死者が出る可能性があるとした。さらに、2013 年 3 月に施設などの被害及び経済的な被害について想定すべき最大クラスの結果を公表した。

このように、東日本大震災で得られた知見を踏まえて、東海地震・東南海地震と南海地震の単独発生や連動発生の場合の強震動予測を行い、それぞれの地震被害を推定することが急務ではあるが、もしその地震被害予測の精度が高くなければ間違った方向に人々を導くことにもなるので、より高精度な予測が必要である。また、その予測精度はいつでもどこでも同じように確保できるわけではない。特に地域の特性を踏まえてより高精度な強震動を予測し、それを非線形建物応答モデルに入力して、西南日本地域における建物の構造種別や高さ、建築年代などの特性を考慮したきめ細かい構造物の被害予測を考えていく必要がある。

この想定地震による建築物被害を定量的に推定するためには、上述のように地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をすべきである。現在でも耐震性の低い建物や老朽化した建物が数多く存在しており、それらの建物の耐震性能に対応した被害予測をすることが重要であるが、現在内閣府をはじめとする様々な機関で実施されている被害予測は予測後に必要となる被害軽減対策立案には結び付かない被害関数を用いた経験的方法で行われている。従って、発生が最も懸念されている南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の被害シミュレーションにおいては、実構造物から評価された建物の属性に対応した統計的に評価された保有耐震性能に準拠して定量的に行っている研究事例はほとんどない。これまでのところ我が国において実建物の耐震性能に準拠して被害予測を行い、それに基づいて南海トラフ沿いの超巨大地震に対する防災インパクトを評価した研究は見当たらず、早急にこれを実施し具体的対策につなげる必要がある。

一方、これまで地球のことをあまり考えずにやってきた人類の大量生産・大量消費による地球温暖化、天然資源及び動物・植物の減少、大気・土壌汚染、廃棄物の大量排出など様々な環境問題が国境を越えて地球規模で問題となっている。日本は昭和 40 年前後から大気・土壌汚染など公害問題と廃棄物の増加、資源・エネルギー問題が起り始め対策が取られて来たが、現在でも依然大きな課題として残されている。このような広い視点に立って自然災害に伴う環境負荷リスクを評価するスキームは十分開発されてきておらず、それを考慮することは単純により安全であればよいとされてきたこれまでの耐震工学・防災工学の方法論

に比べ、新たな地平を切り開くものであるといえる。地震がもたらす社会的・環境的インパクトは被害程度の高さではなく、その総量によるものである。従って被災地域の建物ストック・人口・経済活動等の統計情報を用いて地域ごとの被害総量、具体的には環境負荷量、廃棄物量、死傷者数や避難者数の総量、経済的損害の総量を予測し、それが未来の日本社会にとって耐え得るものであるかどうかを評価し、耐え難い場合にはそれを耐え得るレベルまで低減する施策をそれに必要なコストを評価しつつ立案していく必要がある。

1.2 既往の研究

地震とは、上部マントルや地殻を構成する硬い岩盤（断層面）に蓄えられた応力が急激に解放され（断層運動）、それにより波動（地震波）が地球内部を伝わり、人間の生活する地表面に揺れ（地震動）をもたらす有限な領域での破壊現象である。海域で発生する巨大地震は海底面の地殻変動に伴って大津波を発生させる。被害を及ぼすような地震が発生した際、建築・土木構造物、機械・運送設備、山崩れ、田畑などの物的被害と建物倒壊による圧死、津波による溺死の他にも火災による焼死などの人的被害をもたらす破壊力ある強い地震動が、広い範囲で観測される。その強い地震動を強震動と言う。ある特定の場所でどのような強震動が観測されるかを、歴史地震や過去の地震観測記録、地盤と構造物の実特性等を解析して推定できれば、今後はその想定される地震被害予測を実施し、被害を最低限度に抑えて、経済的にも被害を減らし、震災に備えることが可能となる。

ここでは、大地震における強震動の再現や予測について既往の研究、地震被害予測についての現状、地震被害をもたらす環境負荷評価について簡単に述べたい。

1.2.1 強震動予測

強震動とは、地震の震源断層運動によって地表面で発生する破壊力のある強い揺れ（地震動）のことである。それが震源断層から放出される地震波の特性、震源から観測点の基盤にいたる伝播経路の特性、および基盤より浅い局所的な表層地盤の特性、その3つの性質で表され、それぞれ「震源特性」、「伝播特性」、「増幅特性」と呼ばれている。従って強震動予測に際して、これら3つの特性をすべて精度よく評価する必要がある。それを評価するのに、観測された地震動の統計的解析から地震動の大きさを経験的に得ようとする距離減衰式などの経験式を用いて行う簡便法と、震源断層の破壊過程や地下構造をモデル化し、波形計算を行う詳細法があるが、評価の方法にはさらに詳細に分けて以下の4つがある^[1-26]。

- （1）理論的方法
- （2）経験的方法
- （3）半経験的方法
- （4）ハイブリッド法

理論的方法は、「震源特性」、「伝播特性」、「地盤特性」をすべて実際に則した物理モデルで表現して、理論的に地震動を計算する方法である。この方法では、震源特性は「震源モデル」により、伝播特性と地盤特性は解析的あるいは数値的に求めた「グリーン関数」により表現される。ここに、グリーン関数とは、断層のある点において微少な力を瞬時に作用させたときの（単位インパルス力）、地震動を求めたい

地点における揺れのことである。経験的方法とは、多数の地震記録を統計処理して、マグニチュード、震源距離などをパラメータとする簡便な式（距離減衰式）を求め、計測震度、最大加速度、最大速度、応答スペクトルやフーリエ振幅スペクトルなどを評価し、上記の 3 つの特性を表現する方法である。半経験的方法とは、発震機構や伝播経路を大地震と共有する中小地震の観測波形を理論的方法で必要となるグリーン関数とみなし、これを重ね合わせて大地震の波形を合成する方法である。この方法は、観測波形を多数重ね合わせることから、「半経験的波形合成法」とよばれており、そのグリーン関数法で用いるべき適切な中小地震記録が存在するかないかにより、経験的グリーン関数法、統計的グリーン関数法と分けることもある。ハイブリッド法とは、長周期側では与えられた断層運動に対する地震動を理論的方法により求め、短周期側は半経験的手法で計算して、両者を重ね合わせて評価する方法である。これらの地震動評価方法の有用性は幾つかの研究結果で確認されている。

例えば、古くは米国で、1966 年のパークフィールド地震の時に断層近傍で単純な地震波形が記録されたことから、Aki^[1-27] は断層モデルに基づく理論波形を計算し、観測された地震動と比較して評価した。日本では、Irikura^[1-28]をはじめ、小地震観測記録を重ね合わせることによる大地震動波形を合成する方法（経験的グリーン関数法）が提案された。武村^[1-29]らはすべり量の不均質分布を仮定した半経験的地震動評価法を提案した。釜江^[1-30]らは経験的グリーン関数法を用いて 1946 年南海地震の大阪平野における長周期地震動評価の再現を行った。川瀬^[1-5]らは観測された地震記録と限られた地盤構造情報から構築した二次元盆地端部構造で、観測記録はない三宮地区での強震動を激しかった被害と良く対応するように再現した。釜江^[1-6]らは 1995 年兵庫県南部地震の余震観測結果を用いた経験的グリーン関数法と単純な震源モデルにより本震地動を推定し、実際に観測された最大加速度、最大速度を良く再現できることを示した。さらに松島^[1-8]らは釜江^[1-6]らの提案した独立した単純な震源モデルを基に、4 つのアスペリティからなる不均質断層破壊モデルと、そのアスペリティ内のすべり速度時間関数を同定し、問題になっていた「震災の帯」で観測された周期 1 秒のパルス性地震波形をうまく再現した。壇^[1-31]らは中小規模地震の記録を経験的に得られたグリーン関数とみなして大規模地震による地震動を計算する半経験的波形合成法に、断層の非一様な最終すべり量と最大すべり速度等を考慮する方法を提案した。

こうした兵庫県南部地震以降の様々な研究成果をもとに、入倉^[1-32]は活断層で発生する地震や海溝域で発生する地震による強震動予測を目的として、地形・地質調査データ、歴史地震、地球物理学的調査に基づき、対象とする地震の震源断層モデルおよび強震動評価に必要な断層パラメーターを推定する手続きを系統的にまとめて、「強震動予測レシピ」を作り出した。この「レシピ」は、同一の情報が得られれば誰がやっても同じ答えが得られるように、強震動予測の標準的な方法論となっている。伊藤^[1-15]らは九州地方に発生した中小地震の平均的な性質を反映した統計的グリーン関数を用いて、1995 年兵庫県南部地震の地震動を再現できることを検証したのち、警固断層に対するシナリオ地震予測を実施し、福岡市内の予測強震動を求めた。中道^[1-9]らは、伊藤^[1-15]らと同様に警固断層に対する強震動予測を短周期側は統計的グリーン関数法、長周期側は 3 次元有限差分法を用いて最後に合成し、兵庫県南部地震の強震動が再現できることを示しつつ、広い周波数帯域に対して精度よく強震動を評価した。この他、様々な地震に対して主要な都市にて代表的な予測地震動が現時点における最新の地震学および地震工学的知識を基に作成され、巨大地震に対する予測地震動は幾つかの研究結果として公開されている。例えば、釜江^[1-33, 1-34]らは、想定南海地震および想定東南海の震源モデルによる大阪盆地におけるいくつかの地点での予測地震動を広帯域強震動予測手法である経験的グリーン関数法を用いて予測している。佐藤^[1-35]らは、

想定東南海地震による強震動をハイブリッドグリーン関数法あるいは 2 段階ハイブリッド法によって予測して、他の予測手法と比較することにより、その有効性を確認している。久田^[1-36]らは想定東海地震に対して、統計的震源モデルな $k-2$ モデルを用いた広帯域の強震動作成法を提案し、その妥当性を把握している。山中^[1-37]らは関東平野で、堆層積の 3 次元 S 波速度モデルを用いた想定東海地震によるやや長周期地震動の予測を行っている。古村^[1-38]らは、2004 年紀伊半島南東沖の地震や 1944 年昭和東南海地震を例に関東平野での長周期地震動の生成過程を、最新の海域と陸域の地下構造モデルを用いて復元している。野津^[1-39]は、2003 年十勝沖地震を対して、半経験的グリーン関数法を用いた波形インバージョンにより、対象とする観測点の揺れを再現できるような震源モデルの構築を試みた。

これら先行研究を参考に、南海地震を対象にして、包・川瀬^[1-40]は、釜江モデル^[1-41, 1-42]と推本の公開資料^[1-43]を基に三つの大きなアスペリティと背景領域から成るモデルと、日本全国の内陸地域と海溝付近で起きた比較的マグニチュードが大きい 110 個の地震に対して震源特性・伝播特性・サイト特性を分離して求めた地震タイプや地域性を考慮した長周期（10 秒）まで有効な統計的グリーン関数を用いて、Irikura^[1-28]の波形合成法で重ね合わせて強震動予測を行い、それを非線形応答解析モデルに入力し、震源地域における構造別、年代別、高さごとの建物の被害予測を行っている。包・川瀬^[1-44]はさらに、包・川瀬^[1-39]と同様な南海地震に対する強震動予測を、同じ統計的グリーン関数を用いつつ、最大速度に対する経験的関係への適合度を上げるため、アスペリティ内もさらにすべり量を不均質にした震源破壊過程モデルを提案した。海溝型巨大地震の震源断層の数 10km の大きなアスペリティはその内部を均質にする数秒以下の周期帯域の地震動生成が少なくなるため、アスペリティ内で数 km の小さなスケールで不均質に破壊する手法を導入することにより、その予測精度を改善している。

1.2.2 地震被害予測

防災工学の分野では災害の分析・問題の把握・災害の再現・災害の予測・被害の軽減の方策・災害情報の伝達などを地域防災計画立案のための基礎資料としており、また人の命や財産を守るという観点から、国や各地方自治体で様々な地震被害想定が行われている。地震発生時にどのような被害がどの程度発生するかを推定することで、地域の情報や災害特性に即した地震防災対策の立案・実施につながる事が期待される。1995 年に起こった兵庫県南部地震においては、その気象庁マグニチュードは 7.3 であったにもかかわらず、都市の直下で起こったこともあり、6 千人以上の死者を出し、家屋の全半壊は 24 万棟にものぼった。死亡者の 90%は構造物の崩壊や家具などの転倒による圧死もしくは窒息死であり、ほとんどは即死状態であったとされている。この建物被害の主な原因として、建設年代が古く旧基準（現行設計基準は 1981 年に改正された）によって設計されていたこと、設計時に考慮していた以上の地震動が建物に作用したことなどが挙げられている^[1-45]。しかし、逆に設計以上の地震動が入力したにも関わらず現行の基準で設計された建物は被害が少なかったという事実もある^[1-46, 1-47]。個別建物に対するシミュレーション解析においても観測された被害は神戸海洋気象台などで観測された強震波形よりも小さな入力で生じるという結果が多い^[1-48~1-50]。強震波形は最も被害の酷かったいわゆる「震災の帯」の中で得られたものは少なく、神戸海洋気象台の観測波などは「震災の帯」の中の地震動と比べ小さいにもかかわらずシミュレーションでは大きな被害が発生する結果となっている。

現在性能規定型の耐震設計を導入するという観点から考えると、このような現状は大きな問題であり、

建物の真の終局耐力を定量的に把握する必要がある。たとえ現行の基準で設計された建物は十分安全であるとしても、どの程度安全なのかそしてそれは何故なのかを知らないで「性能」を論じることとはできない。また都市における地震防災対策を講じるためには、将来起こりうる地震の地震動を適切に推定し、地震動と建物被害の関係を定量的に評価することが極めて重要となってくる。

2011年に起こった2011年東北地方太平洋沖地震においては、太平洋三陸沖から茨城沖に渡る広い領域を震源とした超巨大地震の東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)が発生した。気象庁の震度分布からは、震度7となったのは栗原市のK-NET^[1-51]築館(MYG004)だけであったが、震度6強となった観測点は、気象庁(JMA)観測点・自治体震度計を含め、4県40地点に及んだ。しかし主としてその後襲った巨大津波により、2万弱の死者・行方不明者が生じ、建物被害は全壊128,527棟に及び、東日本の太平洋沿岸を中心に壊滅的な被害がもたらされた。津波被害を免れた地域での被害調査では、非常に大きな加速度が記録されたにも関わらず、揺れによる大きな建物被害は少なかったことが報告されている^[1-23]。一方Kawase^[1-52]は兵庫県南部地震においてはその周期1秒のやや短周期パルスが軟弱な大阪盆地端部でのエッジ効果によって大きく増幅され、震災の帯を形成したことを報告している。特に内陸地震の震源域で観測された地震動の卓越周期は一般構造物にとって最も危険な、周期1秒を中心とした「やや短周期域」となることがわかっている^[1-10]。東北地方太平洋沖地震の場合はしかし、例えば境^[1-53]の研究において、多くの観測強震記録で1秒以下の短周期が卓越していて、建物の大きな被害に結びつく1-2秒応答はさほど大きくないと報告されている。すなわち、今回の地震で被害が少なかったのは必ずしも東北地方の建物の耐震対策が十分に進んでいたためではないと考えられる。現在も耐震性の低い建物や老朽化した建物は数多く存在しており、それらの建物の耐震性能を把握し地震被害に備えることは地震安全対策上極めて重要である。このことは近未来に発生するであろう想定地震における建築物被害を定量的に想定するためには、地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をすることが重要であることを示している。

建築・土木構造物、機械設備の固有周期は一般に0.05秒から10秒の範囲にあり、地震学で取り扱う地震波の周期範囲では比較的短周期の領域にある。2003年十勝沖地震、2011年東北地方太平洋沖地震を契機に、内閣府をはじめとする様々な機関で実施されてきた南海トラフ沿いの巨大な地震の被害予測は予測後に必要となる被害軽減対策立案には結び付かない経験的方法で行われて事例がほとんどである^[例えば1-54, 1-55]。そこで使用されている経験的方法もほとんどが兵庫県南部地震の被害調査結果に基づいたものであり、海溝型巨大地震の地震動の特性は反映されていない。すなわち、発生が最も懸念されている南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の被害シミュレーションを、実構造物から評価された建物の耐震性能に準拠して地震動の特性の違いを反映できる方法によって定量的に行っている研究は少ない。

1.2.3 環境負荷評価

人類史上、天然資源の大量使用とそれに伴う環境悪化は今日の近代文明を維持する限り避けられない部分である。しかし発展を続ける産業経済社会における人類の営みを地球が受容しきれなくなりつつある。1972年にローマクラブが発表した「成長の限界」は現在の傾向が続けば100年以内に地球上の成長は限界に達すること、その破局を避けるために成長から均衡へと移っていくことの必要性を訴えた^[1-56]。近年では人類の産業経済活動によって温室効果ガスが過剰に放出されることにより、地球上の気温が上昇しているとの指摘がされている。これらの状況を受け、1997年のCOP3では温室効果ガス排出の削減目

的を定めた「京都議定書」が採択され、日本では、2005 年度より発効した。その前に、「循環型社会形成推進基本法」が 2000 年に公布され、環境への負荷が少ない循環型社会を形成することを目指している。そのなかで住空間の安全性、特に耐震性とそれに伴うコスト、災害発生による環境負荷の社会的スケールでの評価が極めて重要である。例えば、安全な建物は被災危険度を減少させ、少ない社会的損害費用を予想することができる。一方、過度に安全な建物は材料をより多く使い、環境負荷が高くなる。都市スケールで最適化するためには、適切な安全性と環境負荷のバランスを考えなければならない。日本全産業の CO₂ 排出量の約 1/3 と廃棄物量の約 1/5 を占めている建設業界における環境負荷削減の努力や対策は極めて重要である。従って、建築分野では「建設分野における生涯 CO₂ 排出量を 30%削減、建築物の耐用年数を 3 倍（100 年）に延長する」とする学会声明^[1-57]、建物の LCA 方針やデータベースの公開^[1-58, 1-59]、建築関連による環境負荷の予測及び削減に関わる研究が多数行なわれている^[1-60~1-65]。

地震被害による環境負荷は二つの視点から評価することができる。ひとつは、環境負荷を減少できる耐震対策はどのようなものかを考えることであり、もうひとつは、逆に環境負荷に配慮した耐震設計法を求めることである。建物の資産価値にも影響する建物の総合的な環境性能手法や研究が欧米のみならずアジア諸国にも急速に広まっている^[1-66, 1-67]。その多くは人間活動に伴う総合的な環境負荷を評価している^[1-68]。しかし災害、特に地震被害による環境負荷の研究は未だほとんどない。その先駆的な研究のひとつとして、神田^[1-69]は建物の地震危険度、強風危険度、および環境負荷の評価を目的として検討している。しかし、災害による環境負荷リスク低減の問題は個別建物の問題としてではなく、国家的・社会的な観点から最適化されるべきものである。例えば、包・川瀬^[1-70]・川瀬・他^[1-71]の一連の研究では、南海地震に対して都市に存在する種類も様々な建物群を対象にして、地震災害による環境負荷予測を行い、地域トータルのライフサイクルコストやライフサイクル負荷の形でこれを評価し、しかもその被災確率に与える耐震性能向上の施策の効果をモデルに考慮することにより、長期にわたる都市の災害環境負荷リスクを評価できるモデルを構築しており、都市における地震防災対策の立案において、より有効な提案に向けて検討を行っている。

これから発生する地震動のレベルを予測し、地震動強度指標と建物応答の関係に基づいて建物被害を予測できるようになると、地域の建物被害分布とその総量を建物の耐震性能の関数として求めることができる。それを参照して建物の耐震性を増強するか、あるいは取り壊しを促進すべきか等の長期的施策の適用性を判断し、政策的に実施していく必要がある。その判定に際しては、社会コストや人的被害など、様々な視点から評価するべきである。最近特に注目されている視点として建設投資のもたらす人間環境の豊かさとその確保に必要な環境負荷の関係がある。建物の予測被害率と建物ストックの予測結果に基づいて、ある地震が発生した場合の直接的被害に伴う環境負荷、および間接被害に伴う環境負荷を評価する。そして被害を防ぐための耐震補強にかかるコストと使用材料によって増加する環境負荷を評価し、投資効率からみた各種耐震施策の有効性を検討する必要がある。このような広い視野に立って災害に伴う環境負荷リスクを評価するスキームを作れば、単純により安全であればよいとされてきたこれまでの耐震工学・防災工学の方法論よりもより合理的な政策決定を示唆できるスキームとなり得る、地域の建物の特性を反映した被害関数を構築することにより、世界中の地震災害に脆弱な地域に対してもこのスキームを適用することができるので、それぞれの国・地域の実情に応じた地震被害低減施策を提案することが可能となる。

1.3 研究の目的と構成

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた知見を踏まえて、南海トラフ沿いの海溝型巨大地震である東海・東南海地震と南海地震の単独および連動発生時の強震動を長周期まで有効な統計的グリーン関数により定量的に予測し、それを非線形応答解析モデルに入力して、震源域における木造建物、中低層 RC 造建物、低層鉄骨建物の被害予測を実施し相互に比較することにより、南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の震動被害インパクトを把握する。また、原単位および建物ストックの統計値情報を用いてその地震被害がもたらす環境負荷を評価する。これら一連の予測は、その非線形応答を数値的に評価する「建物崩壊挙動シミュレータ」に基づいており、予測被害は建物の実耐震性能の関数となるので、地域の構造物群の耐震性能をどの程度向上させれば上記の構造物被害及び環境負荷をどの程度抑えられるかを定量的に評価することが可能である。即ち、耐震対策効果に見合った必要政策コスト評価が可能となる。以上、本研究においては、南海トラフ沿いの海溝型巨大地震を対象として、建築物の安全性を脅かす強震動を最新の知見に基づき評価するとともに、その震源域における建築物の集合体としての都市空間の震害インパクトを評価し、その軽減を効果的に図る方法を提案するための技術を開発することを目的とした検討を行っている。

本論文は以下の 9 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景、既往の研究、研究の目的および本論文の構成について記述した。

第 2 章では、被害予測モデル構築に向けた検討の一環として、京都大学宇治キャンパスにおける本館及び旧巨大災害研究センター棟を対象に、耐震補強工事の前後に微動観測を行い、その観測データに基づき工事前後の振動特性を抽出して比較を行った。抽出した振動特性と改修図面の情報から建物の被害予測用非線形応答解析モデルを構築し、京都大学宇治キャンパスの東縁に存在する黄檗断層系の地震による想定地震動を入力し、非線形応答解析を行い、耐震補強工事の有効性について検討を行った。

第 3 章では、過去の地震における建物被害の生成原因を地震被害調査によって明らかにすることも被害予測モデルの検証上極めて重要であるため、2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた本震の強震観測記録を分析し、その構造物破壊能を構造物群の非線形応答解析によって被害率を予測する長戸・川瀬建物群モデル(2001, 2002) ^[1-16, 1-17]で評価し、建物被害が比較的軽微なレベルにとどまった理由を観測された地震動の分析によって考察した。この地震について、日本全国の内陸地域と海溝付近で起きた比較的マグニチュードが大きい 110 個の地震に対して震源特性・伝播特性・サイト特性を分離して求めた地震タイプや地域性を考慮した長周期（10 秒）まで有効な統計的グリーン関数^[1-39]と佐藤（2012）^[1-72]の作った 2011 年東北地方太平洋沖地震の想定震源モデルを用いて本震の強震波形を再現した。この再現波形に対しても同様の方法で構造物破壊能を求め、実際に観測された地震動による推定建物被害率や建物調査を行った観測点の観測被害との対応関係を比較した。

第 4 章では、南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の震源を想定するための背景情報として過去の被害地震の発生頻度やメカニズムを整理し、日本列島とその周辺で発生する規模の大きな地震について、起き方や場所によって様々なタイプ地震に分けられること、西南日本では被害地震のほとんどが繰り返し発生している南海トラフ沿いの M8 クラスの巨大地震と、その前後のある時間、いわゆる活動期の間にしか発生していないことを改めて整理した。このことは西南日本における想定震源モデルの構築、地震動予

測、建物被害想定、さらにそれらに基づく震災対策において常に意識しておく必要のある重要な情報である。

第 5 章では、高精度な強震動予測が都市防災や安全な構造物を設計する上で非常に重要であることから、第 4 章で整理した情報をもとに、地震調査推進本部による特性化震源モデル (2003) ^[1-4] に参考にした想定震源モデルと第 2 章で有効性を確認した長周期 (10 秒) まで有効な統計的グリーン関数^[1-39]を用いて南海トラフ沿いの海溝型巨大地震である想定東海地震、東南海地震、南海地震のそれぞれ単独発生および 3 連動発生時の広周期帯域の強震動を算定している。さらに、得られた結果を過去の地震の推定震度分布及び他の研究結果と比較している。また、経験的距離減衰式とも比較し、その妥当性を確認している。

第 6 章では、近未来に発生するであろう想定地震における建築物被害を定量的に想定するためには、地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をすることが重要であるため、第 5 章で得られた計算強震動を、第 2 章で有効性を確認した構造物群の非線形応答解析によって被害率を予測する長戸・川瀬建物群モデルに入力し、非線形応答解析を行って、想定した海溝型巨大地震の単独および連動発生時の震源域から 400km 以内の K-NET、Kik-net、JMA 観測点における木造建物、中低層 RC 造建物、低層鉄骨建物の年代別、階数区分別の被害率予測を実施している。

第 7 章では、被害地震によって建物が破壊されると、その建て替えや修復に大量の資源やエネルギーが使われるだけでなく、大量の災害廃棄物が発生し、その廃棄物を処理する際にも多くの環境負荷が発生することになるため、第 6 章で実施された建物の被害率予測結果、すなわち想定した海溝型巨大地震の単独および連動発生時の震源域から 400km 以内の K-NET、Kik-net、JMA 観測点における木造建物、中低層 RC 造建物、低層鉄骨建物の予測被害率に基づき、包・川瀬 (2007) ^[1-70] の提案した原単位および建物ストックの統計値情報を用いて、その地震被害がもたらす環境負荷を評価している。ここでいう環境負荷とは、建物の被害総数に基づく家具等を含む建築廃棄物量、その地震前の住環境を復元に必要な資源及びエネルギーの産出に必要な CO₂ の量を意味しており、それらを総合的に算定し、想定した地震が起きた場合に京都議定書に設定した CO₂ 目標値や年間排出量に比べどのぐらいの負荷が発生するかを明らかにしている。

第 8 章では、さらに建物の設計耐力を政策的に上昇させていった場合、それが建物の被害総量や環境負荷総量にどの程度影響するかを評価する。この際、旧耐震建物を新耐震建物並みに耐震補強するケースや地域係数を増大させていったケースなどを想定しており、いずれも耐震性能の向上に必要な資源及びエネルギーに必要な環境負荷を考慮している。これにより、あるレベルに環境負荷をとどめるためにはどの程度の耐震性能の向上が必要か、それはトータルとして環境負荷低減に有効な施策となり得る可否かを検討している。

第 9 章では、各章の総括を述べるとともに、今後の課題及び展望について記述している。

第1章の参考文献

- [1-1] 内閣府防災情報のページ：防災白書，2012.
- [1-2] 堀高峰・尾池和夫：西南日本内帯の地震活動統計モデルによる次の南海地震予測，歴史地震，Vol. 12，pp. 141-145，1996.
- [1-3] Hori, T. and K. Oike : A statistical model of temporal variation of seismicity on the inner zone of southwest Japan related to the great interplate earthquake along the Nankai Trough, Journal of Physics of the Earth, 44, pp. 349-356, 1996.
- [1-4] 地震調査研究推進本部：地震調査委員会強震動評価会「南海トラフの地震の長期評価について」，2002. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01sep_nankai/index.htm.
- [1-5] 川瀬博・林康裕：兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく地震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第480号，pp. 67-76，1996. 2.
- [1-6] 釜江克宏・入倉孝次郎：1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第480号，pp. 67-76，1997. 10.
- [1-7] 川瀬博，松島信一，R. W. Graves, P. G. Somerville：「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析-兵庫県南部地震の際の震災帯の成因-，地震，第2輯，50，pp. 431-449，1998.
- [1-8] 松島信一・川瀬博：1995年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第534号，pp. 33-44，2000. 8.
- [1-9] 中道聡・川瀬博：福岡市における三次元地下構造を考慮したハイブリッド法による長周期帯域強震動予測，日本建築学会構造系論文集，第560号，pp. 83-91，2002. 10.
- [1-10] 川瀬博：兵庫県南部地震の地震動，地震荷重-内陸直下地震による強震動と建築物の応答，3.3節，地震荷重委員会限界状態WG，日本建築学会，pp. 63-91，2000. 5.
- [1-11] 長戸健一郎，川瀬博：強震動特性と構造物の被害，月刊 地球／号外 NO. 37，pp. 203-211，2002.
- [1-12] 川瀬博・佐藤智美・福武毅芳・入倉孝次郎：兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのアホール観測記録とそのシミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第500号，pp. 83-92，1995. 9.
- [1-13] 川瀬博：堆積盆地が強震動に与える影響-メキシコシティの場合と神戸市の場合-，第23回地盤震動シンポジウム，pp. 83-91，1995. 10.
- [1-14] 川瀬博，松島信一：三次元盆地構造を考慮した1995年兵庫県南部地震の神戸地域における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第514号，pp. 111-118，1998. 12.
- [1-15] 伊藤茂郎・川瀬博：統計的グリーン関数法による強震動予測の検証と仮想福岡地震への適用，日本建築学会構造系論文集，第540号，pp. 57-64，2001. 2.
- [1-16] 長戸健一郎・川瀬博：建物被害データと再現強震動によるRC造構造物群の被害予測モデル，日本建築学会構造系論文集，第544号，pp. 31-37，2001. 6.
- [1-17] 長戸健一郎・川瀬博：鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第559号，pp. 101-106，2002. 9.
- [1-18] 長戸健一郎・川瀬博：観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と

- 観測地震動への適用, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, NO. 244, pp. 1315-1320, 2002. 11.
- [1-19] 宝音図・川瀬博・那仁満都拉: 地域別の建物振動特性を考慮した被害予測モデル構築手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 642 号, pp. 1433-1441, 2009. 8.
- [1-20] 川瀬博・包那仁満都拉・Dorjpalam Saruul: 建物の動特性調査と統計調査結果に基づいたモンゴル国ウランバートル市における地震被災シナリオ解析, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, NO. 19, pp. 91-96, 2002. 11.
- [1-21] 川瀬博・長戸健一郎・中道聡: ハイブリッド法強震動予測結果に基づいた福岡におけるシナリオ地震の被害予測, 構造工学論文集, Vol. 49B, pp. 7-16, 2003.
- [1-22] 川瀬博・増田有周: 八代市およびその周辺地域の日奈久断層系による地震被害想定, 日本建築学会構造系論文集, 第 581 号, pp. 39-46, 2004. 7.
- [1-23] 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 日本建築学会, 2011. 7.
- [1-24] 川瀬博: 建物の地震被害の予測とその軽減への展望, Journal of Geography, Vol. 110(6), pp. 885-899, 2001.
- [1-25] 南海トラフ巨大地震対策: 「南海トラフの巨大地震モデル検討会」, 2012.
<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>
- [1-26] 工藤一嘉・他: 地盤震動 - 現象と理論 -, 8 章, 入力地震動評価への応用, 日本建築学会, pp. 309-348. 2005. 1.
- [1-27] Aki, K. : Seismic displacements near a fault, Journal of Geophysical Research, Vol. 73, pp. 5359-5376. 1986.
- [1-28] Irikura, K: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green' s function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp. 151-156. 1986.
- [1-29] 武村雅之・池浦友則: 震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価, 地震, 第 2 輯, 第 40 巻, 第 1 号, pp. 77-88. 1987.
- [1-30] 釜江克宏・入倉孝次郎: 1946 年南海地震(Mw=8. 1)時の震源近傍及び周辺地域における強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 455 号, pp. 61-71. 1994. 1.
- [1-31] 壇一男・佐藤俊明: 断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, 第 509 号, pp. 49-60. 1998. 7.
- [1-32] 入倉孝次郎: 強震動予測レシピー大地震による強震動の予測手法一, 京都大学防災研究所年報, 第 47 号, A, pp. 25-45. 2004. 6.
- [1-33] 釜江克宏: 経験的グリーン関数法を用いた想定東南海、南海海時の強震動予測, 平成 16 年度 地震動部会報告書, 土木学会・日本建築学会, Vol. 4. 1, pp. 81-86, 2005. 3.
- [1-34] 釜江克宏: 経験的グリーン関数法を用いた想定東南海、南海海時の大阪地域での強震動予測, 月刊地球, 号外 55. 「巨大地震による長周期地震動一予測と今後の対応策一」, pp. 154-160, 2006. 7.
- [1-35] 佐藤俊明・渡辺基史・早川崇: 巨大地震の長周期地震動予測のための広帯域ハイブリッド法, 平成 16 年度 地震動部会報告書, 土木学会・日本建築学会, Vol. 3. 1, pp. 51-56, 2005. 3.
- [1-36] 久田嘉章・鱒沢曜: 東海地震を想定した入力地震動の策定例, 月刊地球, 号外 55. 「巨大地震による長周期地震動一予測と今後の対応策一」, pp. 176-185, 2006. 7.
- [1-37] 山中浩明・山田伸之: 関東平野における深部地盤の S 波速度構造と想定東海地震によるやや長周

期地震動の予測，月刊地球，号外 55.「巨大地震による長周期地震動 - 予測と今後の対応策 -」，pp. 145-151，2006. 7.

- [1-38]野津厚:2003 年十勝沖地震の特性化震源モデル構築の試みー周期 1-5 秒の地震動を対象としてー，海溝型巨大地震を考える，シンポジウム論文集，土木学会・日本建築学会，pp. 6-13，2006. 2.
- [1-39]包 那仁満都拉・川瀬 博：強震ネットワークデータから構築した広周波数帯域統計的グリーン関数とその南海地震への応用，日本地震工学会，第 7 巻，第 2 号（特集号），pp. 80-95. 2007.
- [1-40]釜江克宏：半経験的手法による強震動予測，20XX 年の南海地震を考えるシンポジウム，建築学会近畿支部，pp. 9-23，2002.
- [1-41]Kamae, K., H. Kawabe and K. Irikura : Strong ground motion prediction for huge subduction earthquakes using a characterized source model and several simulation techniques, 13WCEE, Vancouver, Paper No, 655 (CD-ROM). 2004.
- [1-42]地震調査研究推進本部：地震調査委員会強震動評価部会「南海トラフの地震の長期評価について」，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01sep_nankai/index.htm，2002.
- [1-43]包 那仁満都拉・川瀬 博：統計的グリーン関数法による広周期帯域の地震動予測，日本建築学会学術講演梗概集，B-2，pp. 379-380，2007. 8.
- [1-44]建設省建築研究所：平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，建設省建築研究所，1996.
- [1-45]日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 鉄筋コンクリート造建築物，日本建築学会，1997.
- [1-46]日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 鉄鋼造建築物/シェル・空間構造/容器構造，日本建築学会，1997.
- [1-47]勅使川原正臣・北川良和・川瀬博・宇佐美祐人：兵庫県南部地震における被災地域での強震動特性と建築物の被害解析，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 315-320，1998.
- [1-48]内海良和・関松太郎・田中耕太郎：兵庫県南部地震における SRC 造スーパーラーメン構造建物の解析，日本建築学会学術講演梗概集，B-2，pp. 531-532，1996. 9.
- [1-49]吉田晴彦・瀬戸川葆・前田昇・東端泰夫・木村秀樹・太田義弘：兵庫県南部地震における SRC 造ビル被害の検討（その 1 被害程度と耐震性能の検討），日本建築学会学術講演梗概集，B-2，pp. 539-540，1996. 9.
- [1-50]Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara : STRONG-MOTION SEISMOGRAPH NETWORK OPERATED BY NIED: K-NET AND KiK-net, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3 (Special Issue), pp. 65-74, 2004.
- [1-51]Kawase, H., The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect," constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, Seism. Res. Lett., 67, No. 5, pp. 25-34, 1996. 6.
- [1-52]宝音図・川瀬博・松島信一：2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能，東日本大震災 2 周年シンポジウム，日本建築学会，pp. 293-298，2013. 3.
- [1-53]境有紀：2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性-建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標-，日本建築学会構造系論文集，第 683 号，pp. 35-40，2013. 1.
- [1-54]地震調査研究推進本部：東南海・南海地震対策：「被害想定（予測される震度分布，人的・物的

- 被害，経済害等）」，http://www.bousai.go.jp/jishin/tonankai_nankai/index.html， 2003.
- [1-55]内閣府中央防災会議：南海トラフ巨大地震対策，「南海トラフの巨大地震の被害想定について」，
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_info.html， 2013.
- [1-56]ドネラ・H・メドウズ：『成長の限界ーローマ・クラブ人類の危機レポート』，ダイヤモンド社，
1972.
- [1-57]日本建築学会：活動レポート，気候温暖化への建築分野での対応，日本建築雑誌，Vol. 113, No. 1417，
pp. 91-92， 1998. 1.
- [1-58]日本建築学会：建物の LCA 指針，1999. 11.
- [1-59]日本建築学会：地球環境委員会，<http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s0/news.htm> 2003. 7.
- [1-60]構造安全研究会：(<http://SSWEB.K.U-TOKYO.AC.JP/>)， 2006.
- [1-61]伊香賀俊治・村上周三・加藤信介・白石靖幸：我が国の建築関連 CO₂ 排出量の 2050 年までの予測，
日本建築学会計画系論文集，第 535 号，pp. 53-58， 2000. 9.
- [1-62]萩島理・谷本潤・片山忠久・熊本健：地域特性を考慮した建築解体廃棄物の発生量の将来予測に
関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 562 号，pp. 75-82， 2002. 12.
- [1-63]漆崎昇・水野稔・下山吉之・酒井寛二・森正義：建築物の長寿命化におけるライフサイクル廃棄
物と二酸化炭素排出量に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 563 号，pp. 93-100， 2003. 1.
- [1-64]山田哲・黒川礼子・會澤貴浩・岩田衛：廃棄物重量と LCCO₂ 量に着目した鉄骨造建物における環境
負荷の評価，日本建築学会構造系論文集，第 554 号，pp. 131-137， 2002. 4.
- [1-65]山口義弘・菊池雅史・青山謙一・小山明男：解体工事に伴う建設資材廃棄物の発生量予測，日本
建築学会計画系論文集，第 610 号，pp. 49-56， 2006. 12.
- [1-66]小松幸夫・藤裕久・吉田倬郎・野城智也：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告，
日本建築学会計画系論文報告集，第 439 号，pp. 101-110， 1992. 9
- [1-67]神戸市震災資料室：災害廃棄物処理処分，<http://www.city.kobe.jp/cityoffice/15/020/quake/>.
- [1-68]前川直之：耐震補強工法のコストと効果の分析，2004 年度修士論文，東京大学.
<http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/bitstream/2261/233/1/K-00262.pdf>
- [1-69]神田順・平川倫生：限界状態設計における設計荷重のための最適目標信頼性指標，日本建築学会
構造系論文集，第 523 号，pp. 39-46， 1999. 9.
- [1-70]包那仁満都拉・川瀬博：想定南海地震の予測被害率から推定される環境負荷とそれに対する耐震
施策の与える影響，日本建築学会総合論文誌， No. 6， pp. 87-92， 2008. 2.
- [1-71]川瀬博・那仁満都拉，時系列的な建物被害床面積予測とその環境負荷の評価ー巨大地震被害予測
スキームを用いた時系列被害予測とその環境負荷評価への応用に関する研究 その 2ー，日本建
築学会構造系論文集，No. 645， pp. 1957-1965， 2009. 11.
- [1-72]佐藤智美：経験的グリーン関数法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデループレ
ート境界地震の短周期レベルに着目してー，日本建築学会構造系論文集，第 675 号，pp. 695-704，
2012. 5.

第2章 耐震補強の有効性に関する実証的検討

2.1 はじめに

2.2 研究の背景

2.3 対象建物及び耐震補強概要

2.3.1 対象建物

2.3.2 耐震補強概要

2.4 耐震補強前後の微動観測による解析結果

2.4.1 常時微動計測の方法

2.4.2 微動観測による解析結果

2.5 振動解析モデルを構築及び耐震性評価

2.5.1 解析モデル

2.5.2 耐震性評価

2.6 本章のまとめ

第2章の参考文献

2.1 はじめに

これまで世界各地で、多くの被害地震が起こってきたが、その人的被害の大半は構造物の倒壊等によるものであった。平成7年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）においても、都市の直下で起こったこともあり、6千人以上の死者を出し、その大半は家屋、構造物の倒壊等によるものであったことから、建築物の耐震性向上の必要性が改めて人々に強く認識された。この地震における建物被害の主な原因として、昭和56年以前の旧耐震基準によって設計されていたこと、設計時に考慮した以上の地震動が建物に作用したことなどが挙げられている^[2-1]が、逆に設計以上の地震動が入力したにも関わらず、昭和56年以後の新耐震基準で設計された建物は被害が少なかったという事実^[2-2, 2-3]もある。

近い将来予想される地震に対する建物被害を軽減するためには、建物に作用する地震動特性と実建物の耐震性能の両者の把握が重要であるが、特に、建築基準法では、昭和56年以前に建設された構造物はそれ以後の構造物に比べ耐震性能が低いとされ、現在その耐震診断およびそれに従った耐震補強・耐震改修が推奨されている。しかし、実際の耐震補強・耐震改修がどの程度有効であるかについて観測データに基づいて定量的な検討はほとんどなされていない。これは耐震補強の精神が「新耐震設計法なみに性能を向上させる」という経験主義に基づいたものだからであるともいえる。

本章では、京都大学宇治キャンパス本館（鉄骨造5階建）及び旧巨大災害研究センター建物（鉄筋コンクリート造3階建）の耐震補強工事前後に微動観測を行い、その観測データに基づき工事前後の振動特性を抽出して比較を行った。抽出した振動特性と改修図面の情報から建物の振動解析モデルを構築し、京都大学宇治キャンパスの東縁に存在する黄檗断層系の地震による想定強震動^[2-4]を入力し、非線応答解析を行った。最後に、耐震補強工事前後の振動解析モデルによる応答を比較することにより、耐震補強の有効性について検討を行った。

2.2 研究の背景

平成 7 年（1995 年）兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では、死者数の大部分が建築物の倒壊等による圧迫死や窒息死であったことが報告され、特に新耐震基準が導入された昭和 56 年以前に建築された建築物（旧耐震）に大きな被害が集中し、一方、それ昭和 56 年以降に建築された比較的新しい建築物（新耐震）の被害の程度は軽く、現行の新耐震基準は概ね妥当であることが挙げられている。この被害状況を受けて、平成 7 年 12 月に策定・施行された「建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）」は、大地震による建築物の倒壊等の被害から国民の生命、身体及び財産を保護するため、建築物の耐震改修の促進のための措置を講ずることにより建築物の地震に対する安全性の向上を図り、もって公共の福祉の確保に資することを目的とした法律である^[2-5]。この法律には、まず学校、体育館、病院など多数の者が利用する新耐震基準を満たさない建物を「特定建築物」とし、所有者に積極的に耐震診断や必要に応じた耐震補強を進めることが記されている。平成 18 年には、大規模地震に備えて学校や病院などの建築物や住宅の耐震診断・耐震補強を早急に進めるため、特定建物の範囲の拡大と同時に各種支援、緩和措置及びその用途や利用状況にかかわらず「道路閉塞建物」が盛り込まれた。国の基本方針（中央防災会議，2005）^[2-6]において、住宅や多数の者が利用する建築物の耐震化率を平成 15 年の 75%から平成 27 年までに少なくとも 9 割とする目標を定めるとともに、政府の「新成長戦略」及び「住生活基本計画」においては、住宅の耐震化率を 32 年までに 95%とする新たな目標を定め、建築物に対する指導等の強化や計画的な耐震化の促進を図っている。さらに平成 25 年には、全ての建物が努力義務対象となったほか、特定建築物の名称や範囲が改定された。このうち、「要安全確認計画記載建築物」に対して、耐震診断の実施と報告が義務付けられている^[2-6]。

2011 年東北地方太平洋沖地震を受け、平成 24 年 4 月に、東京都^[2-7]から「首都直下地震等による東京の被害想定」が公表された。また、8 月には、内閣府^[2-8]から「南海トラフの巨大地震に関する被害想定（第一次報告）」が公表された。それぞれの被害想定結果については、首都直下地震では、都内で約 30 万棟の建物が揺れや火災によって被害にあうと想定されている。また、南海トラフ巨大地震では、全国で最大約 182 万棟の建物が全壊・焼失すると想定されており、その 8 割以上（約 154 万戸）が揺れや地震火災によるものとした。図 2-1 に想定南海トラフ巨大地震の基本ケースを例として建物の耐震性が強化された場合の効果を推計した結果を示す。住宅の耐震化率の現状は全国平均で約 79%（平成 20 年）とされている。昭和 56 年以前の旧耐震基準の建物の建替や耐震補強等が行われ、現状よりも建物の耐震化率 100%を推進し、耐震性を持たせることにより、揺れによる建物の全壊棟数は大きく減少することから、死者数は現時点で約 38,000 人と想定されるものが、約 85%減の約 5,800 人に大きく減少するものと推計されている。このことから、建物の耐震性の強化を推進する必要があるといえる。大地震による、特に人的被害を軽減するためには、住宅の耐震化が重要であるが、なかなか耐震化が進まないのが現状である。主な理由としては、マンション等の共同住宅では、費用の問題、合意形成の難しさが挙げられ、戸建住宅では、費用の問題、生活面の煩わしさや、耐震改修工事の効果に対する信頼性の欠如、情報不足が挙げられる。今後も、耐震化に対する人々の意識を高めていく必要がある。

大地震が生じた際に、住宅を含むすべての建物が継続使用可能で、ただちに日常生活あるいは教育活動が再開されるのが理想ではある。しかし、実際には多くの住宅が継続使用には耐えない状態になり、学校施設が一時的な避難施設または地域の防災拠点として他の公共施設とともに重要な役割を果たして

きたのは過去の地震被害経験が示すとおりである。したがって、学校施設の耐震診断及び耐震補強が公的な防災対策の中心課題として推進されるべきであることは論をまたない。第2次国立大学等施設緊急整備5ヶ年計画内に耐震化率93%、平成27年には耐震化率98%を達成することが目標とされる中で、京都大学においても平成18年より耐震化計画^[2-9]が進められている。

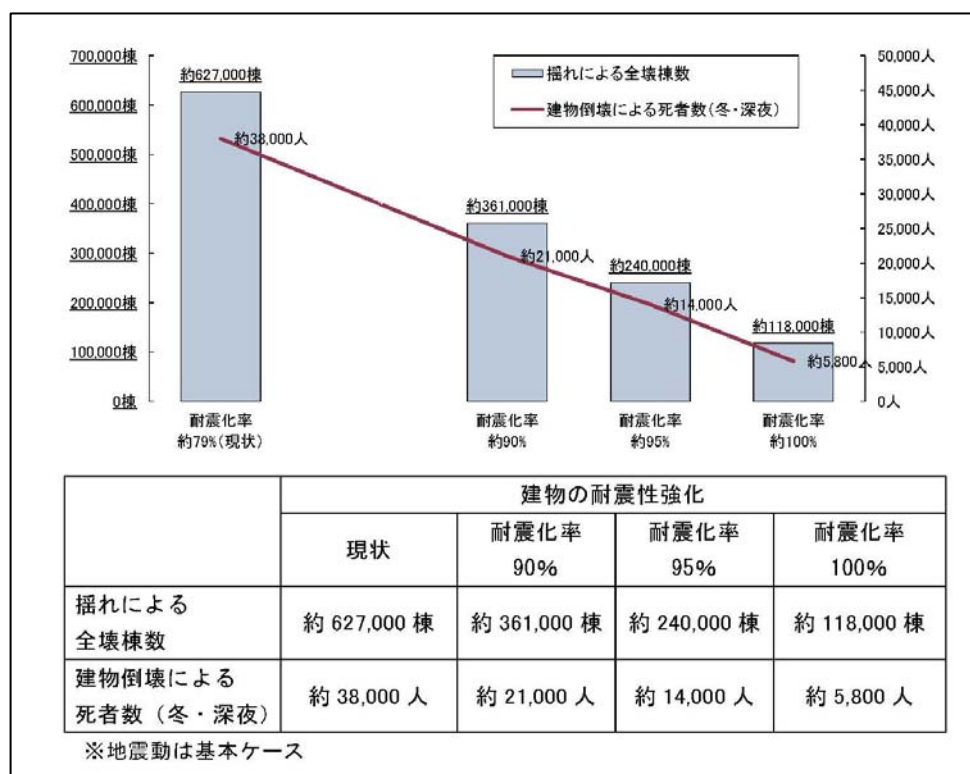


図 2-1 建物の耐震性が強化された場合の効果（中央防災会議，2012）

2.3 対象建物及び耐震補強概要

2.3.1 対象建物

対象建物は京都大学宇治キャンパスにおける宇治地区研究所本館（以後、本館）と巨大災害研究センター棟（以後、センター棟）の二つ建物である。図 2-2 には京都大学宇治地区における検討対象とした建物の位置を示す。すなわち、赤色の丸印で示している処である。宇治地区研究所本館は一部が昭和 40 年代に竣工、その後 10 年以上かけて増築され、南棟(M 棟)、北棟(N 棟)、東棟(E 棟)、西棟(W 棟)および増築棟からなり、エキスパンションジョイントで縁がつながった鉄骨造 5 階建ての建物である。南棟、北棟の西側の半分には地下 1 階 (B1) があり、1 階の真中にピロティ (通路) が一ヶ所ある。東棟につながっている増築棟の両側に 1 階、2 階ともにピロティが二ヶ所あり、同じ方向の西棟の 1 階にピロティが二ヶ所ある。図 2-3 にはその 1 階平面図を示す。なお、今回の耐震補強工事では西棟の西側には 1 スパン増築棟が追加された。図 2-3 の青色の丸印で示している処である。写真 2-1 には本館 M 棟の北側からの外観写真を示す。

巨大災害研究センター棟は昭和 48 年に建設され、1 階が高床式となっており、床下部に、第 2 種構造要素柱が存在する鉄筋コンクリート造 3 階建ての建物である。1 階の 1 スパンは平屋となる。図 2-4 にはその 1 階平面図を示す。長手方向 (X 方向) は 6 スパン、短手方向 (Y 方向) は 4 スパンからなる構造物である。写真 2-2 にはその耐震補強前の北東面からの外観写真を示す。



図 2-2 京都大学宇治地区耐震性能マップ (京都大学, 2007 年 現在)

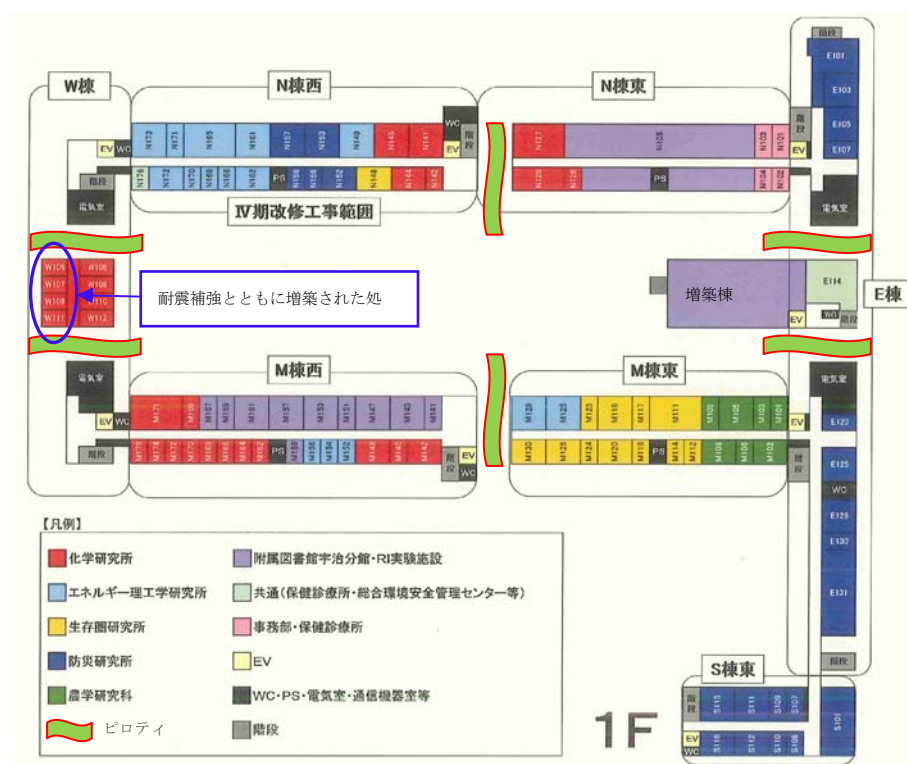


図 2-3 宇治地区研究所本館 1 階平面図（京都大学本ページより，加筆）



写真 2-1 本館南棟(M 棟)の北側からの耐震補強前の外観写真

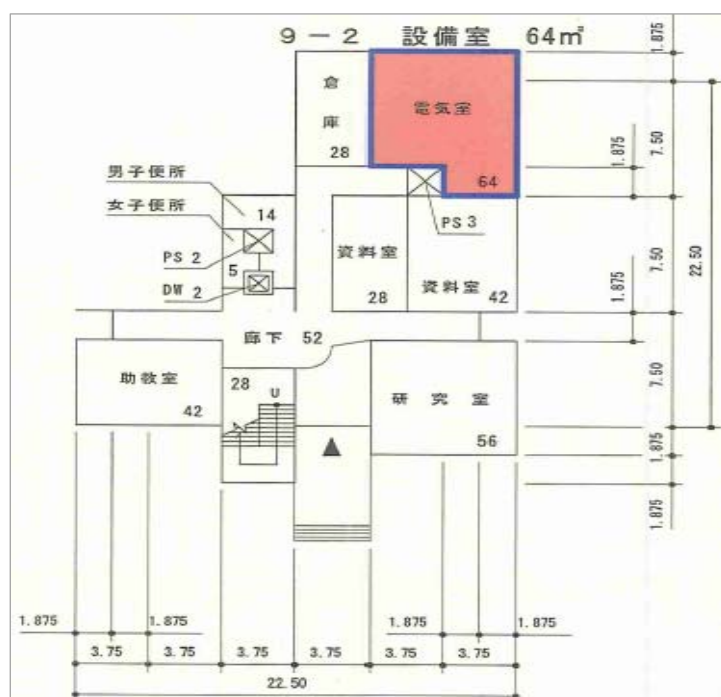


図 2-4 センター棟の 1 階平面図



写真 2-2 センター棟の北東面からの耐震補強前の外観写真

2.3.2 耐震補強概要

第2次国立大学等施設緊急整備5ヶ年計画内に耐震化率93%、2015年には耐震化率98%を達成することが目標とされる中で、京都大学においても2006年より耐震化計画^[2-9]が進められている。宇治地区研究所本館の初期竣工部は建築基準法に基づいて設計されていない。また、その後の増築部分は、新耐震設計基準には準拠していない構造物である。いずれも要耐震補強と判定され、2007年夏から耐震・機能改修工事が開始された。宇治キャンパス研究所本館はM棟、N棟、E棟、W棟および増築棟からなり、耐震補強工事前はエキスパンションジョイントあるいは直接縁がつながった鉄骨造5階建ての建物である。図2-3から分かるように本館M棟は耐震改修前にはE棟とW棟と結合されていたが、第Ⅰ期工事の際にE棟と、第Ⅲ期工事の際にW棟と切り離された。第Ⅱ期工事の際にM棟はE棟とはエキスパンションジョイントで接続し、M棟の西側の東半分には地下1階（B1）があり、1階の真中にピロティ（通路）が一ヶ所ある。

M棟の耐震診断結果及び補強計画を表2-1に示す。耐震診断では、鋼材の錆状況については進行しておらず問題ないと診断されたが、長手方向は純ラーメン架構であり、1階～4階においてIs値、qi値は目標値を下回り、短手方向もIs値、Qi値は目標値を下回って耐力が不足していると診断された。1階～4階の剛性が小さいため1階～4階には鉄骨ブレースによる強度型の補強が必要という診断になった。目標耐震性能はIs値（建物の強度や粘りに加え、その形状や経年状況を考慮した耐震指標）0.7以上、qi値（保有水平耐力：建物が地震による水平方向の力に対して対応する強さ）は1.0以上とされ、建物の使用機能を極力害わないで建物の耐力を増強するために、逆V字形鉄骨ブレースを設け耐力の向上が計られている。ブレースの配置は長手方向両端通りの1階において13ヶ所、2階～4階で各12ヶ所の合計49ヶ所に設置され、短手方向において北側通りと真中通りの間に1階～3階で各10ヶ所、4階で8ヶ所の合計38ヶ所（Bで示す）に図2-5に示すように設置された。補強方法として、長手・短手方向ともに、1階～4階に鉄骨ブレースで補強することにより、不足していた耐震性能は目標値を上回っている。このように鉄骨ブレースの増設により建物耐力を向上させることを目標としている。また、建物の耐震強度を高める工事のほかに、鉄骨柱の耐火性能を向上させるために壁・天井を除去して柱の表面被覆工事も行われている。

センター棟は昭和48年に建設され、建設後30年以上を経過しており、老朽化ならびに構造耐力不足が懸念されるため、耐震診断が実施された。なお、診断は「2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説」に準じて実施された。調査項目としては現状2次診断計算、コンクリート圧縮強度・中性化深さの測定、不同沈下量の測定、柱・梁・壁・床の損傷度調査などが行われた。写真2-2にはその耐震補強前の北西面からの外観写真を示す。図2-4には1階平面図を示す。その耐震診断で

表 2-1 本館 M 棟 (南棟) の耐震診断及び補強計画

M棟 西側										M棟 東側									
階 数	補強前				補強後				ブレース 増設	階 数	補強前				補強後				ブレース 増設
	Isx	qSt*	Isy	qSt*	Isx	qSt*	Isy	qSt*			Isx	qSt*	Isy	qSt*	Isx	qSt*	Isy	qSt*	
5F	1.16	1.86	0.89	1.42	1.13	1.81	0.88	1.41		5F	1.22	1.95	1.11	1.78	1.26	2.01	1.14	1.83	
4F	0.58	0.93	0.43	0.69	0.90	1.50	0.75	1.26	10	4F	0.58	0.94	0.53	0.82	0.94	1.53	0.82	1.30	10
3F	0.50	0.80	0.42	0.66	0.75	1.25	0.80	1.33	11	3F	0.43	0.69	0.43	0.67	0.72	1.16	0.72	1.18	11
2F	0.67	0.92	0.44	0.70	0.78	1.30	0.87	1.46	11	2F	0.76	0.90	0.69	0.87	1.01	1.34	0.92	1.35	11
1F	0.62	0.86	0.34	0.54	0.72	1.21	0.72	1.21	12	1F	0.65	0.88	0.65	0.85	0.79	1.14	0.82	1.19	11
最小値	0.50	0.80	0.34	0.54	0.72	1.21	0.72	1.21	44	最小値	0.43	0.69	0.43	0.67	0.72	1.14	0.72	1.18	43

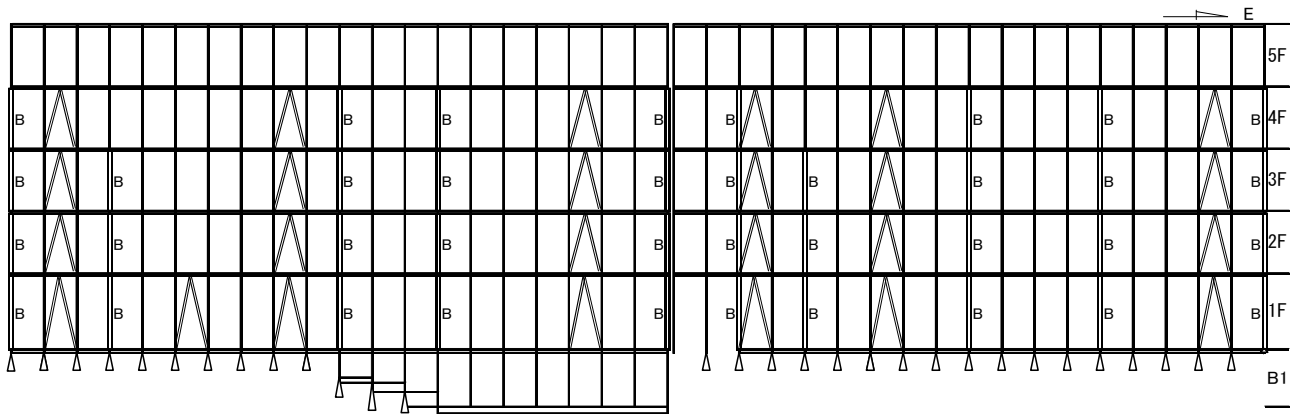


図 2-5 本館 M 棟(南棟)の北側通りの鉄骨フレームに設置したブレース配置イメージ図

は、最大沈下量は両方向ともに 1/250 以下であり特に問題なく、コンクリート平均圧縮強度は 34N/mm^2 であり、各階共に設計強度 21N/mm^2 を満足しているが中性化深さは 1 階を除く階で鉄筋位置に達して、今後鉄筋の錆発生が予測された。柱などの損傷度調査では、コンクリートのクラック診断が行われ、ひび割れ 0.3mm 以上が測定された。壁面に 0.3mm 以上のクラックは各階共に多く見られ、床と梁についてはそれぞれ 2 階、3 階に一部クラックが見られた。2 次耐震診断では、床下部のせん断柱や各階の脆性柱を考慮し、2 階～床下部において I_s 値は両方向共に目標値を下回って耐力が不足し、2 階～床下部の剛性が小さいため 2 階～床下部に構造補強が必要という診断になった図 2-6 には耐震補強前後においたある面の断面図を示す。各階には、既設鉄筋 40d を残し床スラブが撤去され、新たに鉄筋コンクリート製床スラブが新設された。コンクリート壁・コンクリートブロック壁、ブランドボックス等も撤去された。屋上では、床・壁・梁等コンクリート躯体の一部が撤去され、既設屋根の上に新しい斜め屋根が打ち上げられた。補強方法として、柱補強、壁補強は既設部のみが行われ、新設コンクリート外壁（そで壁）の増設、既設コンクリート外壁の高圧水洗浄及び下地補修の上の外装用吹付材、防水・放火塗膜などにより仕上げられた。

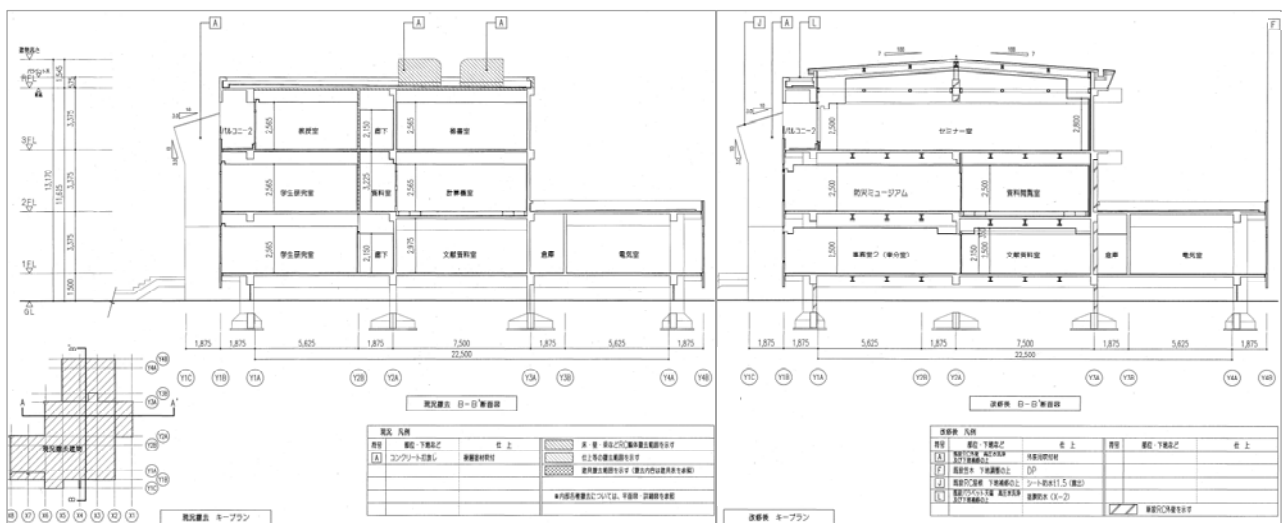


図 2-6 センター棟のある面の耐震補強断面図

2.4 耐震補強前後の微動観測による解析結果

2.4.1 常時微動計測の方法

1) 観測システム

交通機関や工場等の人為的な活動、および風、海洋の波浪や火山活動等によって、地盤や建物は地震時や強風時以外でも、人体には感じられない程度に微かに振動しており、これを常時微動と呼んでいる。常時微動観測は、場所を問わず比較的容易に実施することができ、さらにコストもかからないことから、振動特性を手軽に把握できる方法として広く用いられている。

本研究の計測は 0.1 倍から 10,000 倍のアンプ付き、可搬型の 3 成分加速度計アカシ SMAR-6A3P（写真 2-3）を用いて行った。ハイカットフィルター周波数を 50Hz、サンプリング周波数を 100Hz とし、15 分間 1 セットで計測することとした。



写真 2-3 計測に用いた微動計

2) 計測方法

構造物は耐震診断で補強が必要となった場合には、補強の前と後で、微動観測などにより構造物の揺れを観測して、補強前後の共振振動数の変化により補強効果を確認できることが期待される。耐震補強工事を実施した本館とセンター棟を対象に、耐震改修の影響が振動特性にどのように現れるかについて把握するため、これらの耐震補強工事前後に微動観測を行った。本館について、第 I 期耐震補強工事が始まってから合計 7 回の微動観測を行った。また、大塚ら^[2-10]による E 棟の耐震補強工事前と工事中の微動観測を合わせると合計 9 回の観測を行ってきたことになる。センター棟については、耐震補強工事前後にそれぞれ 1 回の観測を行った。我々の計測では、本館には 1 階に 2 点、2 階以上の各階の一端および地表に 1 地点で同時に 15 分間の微動を計測し、2 階以上の各階の一端の地点を他端に盛り替えて、計 2

セットを微動計測した。センター棟には各階に3地点および地表に1地点で同時に15分間の微動計測を行った。時刻校正はGPS時刻信号によって行い、各地点の同時刻性を確保した。

3) 解析手法

a スペクトル解析

本研究で実施した微動計測の波形処理では、常時微動計測により得られた加速度の時刻歴のデータのうち、建物の1階で得られた計測記録を X_i 、建物の最上階もしくは屋上で得られた計測記録を Y_i として解析を行った。まず、高速フーリエ変換(FFT)によって i 番目の有限フーリエ変換 $X_i(\omega)$ 、 $Y_i(\omega)$ を求める。これらを用いて、解析に用いる N 個のブロックのアンサンブル平均からパワースペクトル $S_{XX}(\omega)$ 、 $S_{YY}(\omega)$ とクロススペクトル $S_{XY}(\omega)$ を計算する。

計算式は次式のようなになる。

$$S_{XX}(\omega) = \frac{2}{NT} \sum_{i=1}^N \{X_i(\omega)X_i^*(\omega)\} \quad (2.4.1)$$

$$S_{YY}(\omega) = \frac{2}{NT} \sum_{i=1}^N \{Y_i(\omega)Y_i^*(\omega)\} \quad (2.4.2)$$

$$S_{XY}(\omega) = \frac{2}{NT} \sum_{i=1}^N \{X_i^*(\omega)Y_i(\omega)\} \quad (2.4.3)$$

ここに、上付きの*は共役複素数であることを示す。

上記のパワースペクトル、クロススペクトルから伝達関数 $H(\omega)$ 、フェイズ関数 $\theta(\omega)$ 、コヒーレンス $coh^2(\omega)$ 、スペクトル比 $R(\omega)$ を次式によって算定する。なお、伝達関数については、入出力ノイズの状態によっていくつかの算定式があるが、構造物については入力側のノイズが少ないことを考慮して、次式を用いた。

$$H(\omega) = \sqrt{\frac{S_{XY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)}} \quad (2.4.4)$$

$$\theta(\omega) = \tan^{-1} \left(\frac{Q_{XY}(\omega)}{K_{XY}(\omega)} \right) \quad (2.4.5)$$

$$coh^2(\omega) = \frac{|S_{XY}(\omega)|}{S_{XX}(\omega)S_{YY}(\omega)} = \frac{\sqrt{K_{XY}^2(\omega) + Q_{XY}^2(\omega)}}{S_{XX}(\omega)S_{YY}(\omega)} \quad (2.4.6)$$

$$R(\omega) = \sqrt{\frac{S_{YY}(\omega)}{S_{XX}(\omega)}} \quad (2.4.7)$$

ここで、 $\text{Im}()$ 、 $\text{Re}()$ はそれぞれ虚部、実部を表している。

b 共振振動数の抽出

地震時の建物が揺れる特性は多様であり、同じ地域において同じ地震でも建物それぞれに揺れ方が異なる。また、建物の固有周期と地震動の周期が一致する共振が起こると、建物の揺れが大きくなる特徴がある。建物の周期の中で一次固有周期が最も大きく影響し、建物耐力が地震動に耐えられなくなると破壊が生じ始める。

本論文におけるデータ処理では、まず微動計測から得られたデータを 50%オーバーラップさせて、40.96 秒の小区間に切り出す。そしてそのフーリエスペクトル及び建物の最上階もしくは屋上と 1 階のフーリエスペクトル比を求め、アンサンブル平均値を計算した。求めたフーリエスペクトル比の 1 次ピークを共振振動数とし、建物の梁間方向と桁行方向のそれぞれについて読み取る。この際、ピークが明瞭でない場合には、フェイズが 0° 付近から 180° 近くまで急速に変化する振動数帯域の中で 90° 付近の振動数であることや、コヒーレンスの急激に低下する振動数であることも振動数判定の補助情報とした^[2-11]。

2.4.2 微動観測による解析結果

微動観測データに基づき解析した本館の平均共振振動数を表 2-2 に示す。また、大塚ら^[2-10]の解析した E 棟の補強前、補強工事中の一つ観点のみの各地点の 1 次固有振動数も示す（一は未計測を意味する）。ただし、大塚ら^[2-10]は建物の階ごとに観測した加速度波形のフーリエスペクトルの垂直方向と水平方向の比の 1 次ピークから建物の共振振動数を求めているという点が我々の解析とは異なっている。耐震診断解析モデルの補強前の短手、長手方向の 1 次固有振動数と補強後の短手、長手方向の 1 次固有振動数も示す（このモデルでは補強前後・長手短手の区別がされていない、E 棟は補強前後の区別があり）。微動による共振振動数は耐震診断解析モデルの振動数よりも高い振動数を示している。これは、微動の振幅と設計時に

通常想定している強震、強風時とは振幅レベルに隔たりがあることが原因として挙げられる。さらに、内装材、間仕切など 2 次部材による影響が考えられる。耐震補強工事前後の振動特性の抽出にあたっ

表 2-2 本館の耐震補強工事前後の微動観測による平均共振振動数

建物	観測回数	耐震補強前		耐震補強後		耐震診断解析モデル				工事前*	工事中*
		短手	長手	短手	長手	短手_前	長手_前	短手_後	長手_後	短手	短手
N棟_東	西側_W	3.015	3.281	3.003	2.938	1.949					
	東側_E	2.886	3.337	2.708	2.943						
N棟_西	西側_W	2.893	2.913	3.394	2.872	1.894					
	東側_E	2.923	2.986	3.456	3.078						
M棟_東	西側_W	3.342	3.000	2.844	2.641	1.960					
	東側_E	2.641	2.970	2.618	2.515						
M棟_西	西側_W	3.332	2.877	3.396	2.852	1.949					
	東側_E	3.451	2.893	3.417	2.897						
W棟	北側_N	3.280	3.344	3.395	3.135	1.934					
	南側_S	2.992	3.314	3.398	3.084						
E棟	南側_S	2.527	2.528	2.206	2.595	1.908		1.949		2.54	—
	南側_Sc	2.532	2.530	2.193	2.590					2.54	—
	北側_Nc	2.816	2.528	2.197	2.575					2.83	—
	北側_N	2.900	2.601	2.201	2.571					2.93	2.74

* 大塚らの解析により

【単位：Hz】

ては、1 階に対する 2 階～5 階のフーリエスペクトル比の 1 次ピークから読み取った共振振動数を求めることにより推定した。

$$f = \omega/2\pi = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.4.8)$$

$$k = (2\pi)^2 m f^2 \quad (2.4.9)$$

f : 振動数, k : 剛性, m : 質量

数式 (2.4.8) と (2.4.9) に示す通り、共振振動数は建物の質量と剛性から決まる最も基本的な振動特性であり、もし、同じ階数で、質量が同じなら共振振動数の 2 乗が建物の剛性に比例し、さらに単純に考えて最大耐力に対応する限界変位が一定なら剛性は建物耐力に比例するので、耐震補強前後の微動観測から得られた共振振動数による振動特性を比較することにより、その耐震補強前後の建物耐力の変化について把握することができるものと期待される。

微動計測による M 棟の耐震補強前後の共振振動数の比較を図 2-7 に示す。M 棟において耐震改修後の振動数は耐震改修前より低いかほぼ等しいということが分かった。特に、M 棟東側の補強前の短手方向の観測地点ごとの共振振動数は異なっていたが、長手方向ではあまり明確な差がなかった。補強前の M 棟は E 棟と縁が切られており、W 棟とはつながっていたので、M 棟の平均共振振動数はその影響を受けていたと推測される。例えば、M 棟東側の短手方向二回目の観測点（東側）の振動数 2.64Hz は耐震補強前の E 棟長手方向の南側観測点の振動数 2.53Hz と近い値となっており、M 棟西側の短手方向二回目観測点（西側）の振動数 3.33Hz は耐震補強前の W 棟長手方向二回目観測点（南側）の振動数 3.31Hz とほぼ同じ、M 棟の短手方向一回目観測点（北側）の振動数 3.28Hz は耐震補強前の N 棟東側長手方向井二回目観測点（西側）の振動数 3.28Hz と、同じ値になっている。なお M 棟および N 棟ではピロティ（通路）があるところの振動数は両端より高くなっているが原因は不明である。M 棟東側の短手・長手方向の共振振動数はともに耐震補強前より下がったが短手方向観測点ごとの差は小さくなった。これは M 棟西側と切り離れた影響と推測される。耐震改修前に独立になっていた M 棟西側の短手方向の共振振動数は耐震補強前より大きく上がった。これは耐震補強の効果と推測される。N 棟東側の短手・長手方向の共振振動数はともに耐震補強前より下がったが M 棟東側と同じ短手方向観測点ごとの差は小さくなった。E 棟も共振振動数は耐震補強前より下がっている結果が観測された。大塚ら⁶⁾の結果では耐震改修中も下がっていることを示してい

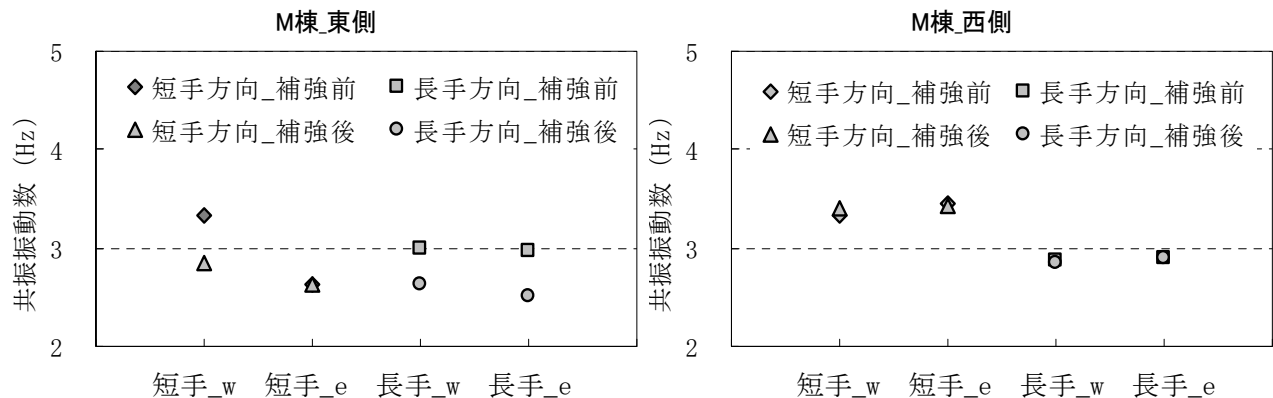


図 2-7 耐震補強工事前後の本館 M 棟(南棟)の共振振動数の比較

表 2-3 センター棟の補強工事前後の微動観測による平均共振振動数

補強	階数	東北側		西南側		東南側	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW
補強前	2F/1F	5.176	5.868	5.119	5.872	5.164	5.375
	3F/1F	5.164	5.819	5.143	5.892	5.147	5.387
	絶対偏差	0.070	0.072	0.062	0.056	0.058	0.051
補強後	2F/1F	6.160	6.466	6.226	6.437	6.173	6.303
	3F/1F	6.132	6.466	6.222	6.449	6.128	6.303
	絶対偏差	0.059	0.069	0.055	0.051	0.055	0.031
補強後/補強前2F		1.190	1.102	1.216	1.096	1.195	1.173
補強後/補強前3F		1.188	1.111	1.210	1.095	1.191	1.170

【単位：Hz】

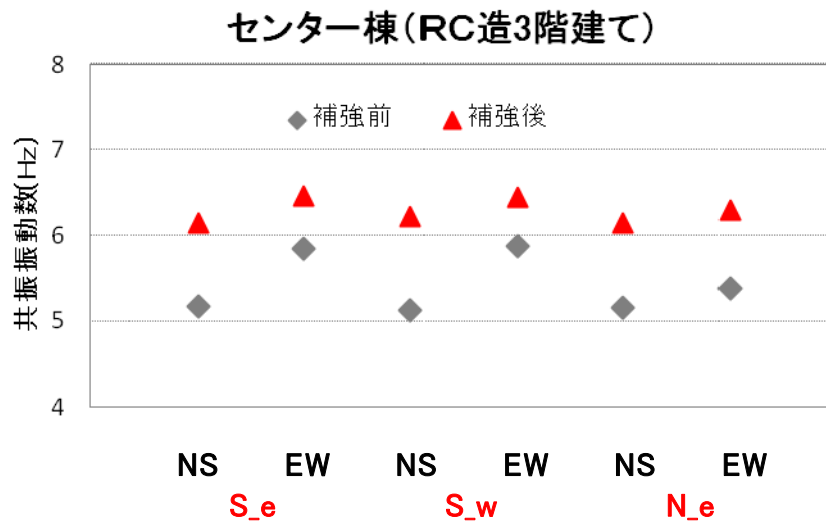


図 2-8 センター棟の共振振動数の比較

る。W棟の西側には1スパン増築棟が追加されたので、短手方向の共振振動数は耐震補強前より上がったが長手方向の振動数は耐震補強前より小さい値が観測された。この棟では耐震補強による振動数変化として議論するのは難しい。M棟西側の短手・長手方向の観測点ごとの共振振動数はともに耐震補強前後で類似しており明確な変動が見られない。これはこの棟では耐震補強工事を行う前にW棟およびM棟東側とは既に切り離された状況のもとで微動観測を行ったためと推察される。

微動観測により解析したセンター棟の平均共振振動数を表 2-3 に示す。その標準偏差も示す。耐震改修後は、センター棟の長手方向 (EW)、短手方向 (NS) の共振振動数は耐震補強前より大きく上がった。これは耐震補強の効果と推測される。その耐震補強前後の共振振動数の比較を図 2-8 に示す。縦軸は1階に対する2～3階のフーリエスペクトル比を求め、アンサンブル平均値を計算した振動数、横軸は観測された地点を示す。耐震補強前後にどの観測点においても長手方向の振動数が短手方向の振動数より高いことがわかる。また、耐震前の短手方向の観測地点と長手方向の観測地点の共振振動数の差が大きくなっていたが耐震後には、その差がほとんど見られない。

2.5 振動解析モデルを構築及び耐震性評価

2.5.1 解析モデル

建物に作用する地震力に対応して生じる被害レベルを知るために地震応答解析を行う必要がある。耐震改修図面から階高、設計層せん断力と重量を拾い出し、詳細応答解析モデルを構築した。観測された共振振動数を再現できるように、建物剛性を推定し、得られた振動解析モデルの復元力特性を既往研究^{9)、10)}に従い設定した。振動解析モデルの構築においては、補強前と後で、観測を行った観測地点のうち振動数の一番低かった地点の共振振動数を再現できるような多質点せん断系モデルを構築した。階ごとの剛性は改修図面から拾い出した階ごとの層せん断力とその 1 階の層せん断力の比を取り、そしてその比と 1 階の剛性（仮剛性）を掛けて初期標準モデルにおけるその階の剛性とした。観測した振動数を再現できるまで、繰り返して解析を行い、解析モデルの各階の剛性を設定した。減衰は瞬間剛性比例型で、減衰定数は 3%とする。研究所本館 M 棟西側と東側の振動解析モデルの重量、階高、剛性、1 次共振振動数を表 2-4 と表 2-5 にそれぞれ示す。センター棟の振動解析モデルの重量、階高、剛性、1 次共振振動数（平均共振振動数の中で一番低い値）を表 2-6 に示す。このように階数ごとに補強前より剛性が低くなった場合と高くなった応答解析モデルで、その微動観測で得られた 1 次共振振動数が再現できた。その他のモデルパラメーターと解析については長戸・川瀬建物群モデル^[2-12, 2-13]を参考にした。

表 2-4 本館 M 棟（南棟）東側の振動解析モデルのパラメーター

補強	M棟_東側_補強前				M棟_東側_補強後			
方向	長手方向				長手方向			
階数	重量 [tf]	高さ[cm]	剛性[tf/cm]	振動数[Hz]	重量 [tf]	高さ[cm]	剛性[tf/cm]	振動数[Hz]
5	844. 67	330	3452. 74	2. 970	842. 44	330	1608. 69	2. 515
4	862. 50	330	2725. 17		780. 14	330	2406. 09	
3	877. 87	330	2642. 22		780. 83	330	2373. 62	
2	899. 09	330	4070. 50		791. 76	330	3031. 71	
1	891. 38	405	4389. 59		799. 11	405	2796. 74	
階数	短手方向				短手方向			
5	844. 67	330	2755. 40	2. 641	842. 44	330	1737. 90	2. 618
4	862. 50	330	2098. 25		780. 14	330	2307. 78	
3	877. 87	330	2222. 69		780. 83	330	2705. 63	
2	899. 09	330	3430. 80		791. 76	330	3475. 83	
1	891. 38	405	3682. 86		799. 11	405	3267. 11	

表 2-5 宇本館南棟(M 棟)西側の振動解析モデルのパラメーター

補強	M棟_西側_補強前				M棟_西側_補強後			
方向	長手方向				長手方向			
階数	重量 [tf]	高さ[cm]	剛性[tf/cm]	振動数[Hz]	重量 [tf]	高さ[cm]	剛性[tf/cm]	振動数[Hz]
5	1192. 62	330	4240. 36	2. 877	1226. 31	330	3050. 39	2. 852
4	927. 63	330	3158. 38		933. 30	330	3716. 11	
3	927. 63	330	3433. 01		939. 54	330	3913. 67	
2	933. 97	330	4564. 55		946. 49	330	4728. 03	
1	1009. 37	405	4728. 98		1023. 32	405	4868. 57	
階数	短手方向				短手方向			
5	1192. 62	330	6001. 51	3. 332	1226. 31	330	3398. 00	3. 396
4	927. 63	330	4123. 17		933. 30	330	4269. 98	
3	927. 63	330	4934. 51		939. 54	330	5567. 05	
2	933. 97	330	5960. 13		946. 49	330	7010. 02	
1	1009. 37	405	6561. 61		1023. 32	405	7278. 41	

表 2-6 センター棟の振動解析モデルのパラメーター

補強	センター本館__補強前				センター本館__補強後			
方向	長手（EW）方向				長手（EW）方向			
階数	重量[tf]	高さ[cm]	剛性[tf/cm]	振動数[Hz]	重量[tf]	高さ[cm]	剛性[tf/cm]	振動数[Hz]
3	338.60	337.5	2619.11	5.375	528.26	337.5	2426.57	6.303
2	492.09	337.5	2626.67		515.10	337.5	4031.30	
1	592.56	337.5	3077.11		622.45	337.5	6320.25	
方向	短手（NS）方向				短手（NS）方向			
3	338.60	337.5	1544.94	5.119	528.26	337.5	3576.14	6.160
2	492.09	337.5	2087.87		515.10	337.5	3930.45	
1	592.56	337.5	2920.90		622.45	337.5	4823.18	

2.5.2 耐震性評価

香川ら^[2-4]は京都盆地南東部に位置する黄檗断層近傍の強震動評価を行っている。図 2-9 に対象構造物位置に対応する計算メッシュで予測された結果を示す。想定した断層破壊シナリオは破壊開始点を二箇所設定されている。両シナリオのうち最大水平加速度は約 1,500Gal であった。本研究では、その想定強震動を応答解析の入力地震動として用いる。M 棟の西側と東側およびセンター棟の振動解析モデルに宇治キャンパス位置の想定強震動を入力したときの最大層間変形角応答の大きくなった破壊開始点 (M 棟は破壊開始点 1 のみ) での最大層間変形角応答分布を図 2-10 と図 2-11 にそれぞれに示す。

図 2-10 の最大層間変形角分布においてどの耐震補強前の振動解析モデルにおいても 3 階の応答が大きいがわかる。またブレースを増設しなかった 5 階においては耐震補強後の方が最大層間変形角の応答が大きくなることがわかる。M 棟西側の振動応答モデルの 1 階～4 階では補強前と後を比較しても最大層間変形角の応答はほぼ同じか、一部少し小さくなっていることがわかる。共振振動数には補強前後において明確な差が観測されていなかったが、これは剛性が上がった影響と重量が増えた影響が相殺されていたものと推定される。初期剛性が耐力に比例するという仮定の元では補強後のモデルの耐力も上がっており、耐震補強の効果は提案解析モデルに反映されているといえる。M 棟の東側の振動解析モデルの最大層間変形角分布においては、突出していた 3 階の最大応答がかなり小さくなり応答が平準化したことが分かる。1 階の応答自体は耐震補強前よりも若干大きくなっているが、耐震補強後は 1 階が最大で、上階ではすべてそれ以下となっている。これは耐震補強の効果によるものと推定される。

以上から、M 棟の西側・東側いずれの場合でも大破クライテリオンである最大層間変形角 1/30rad は

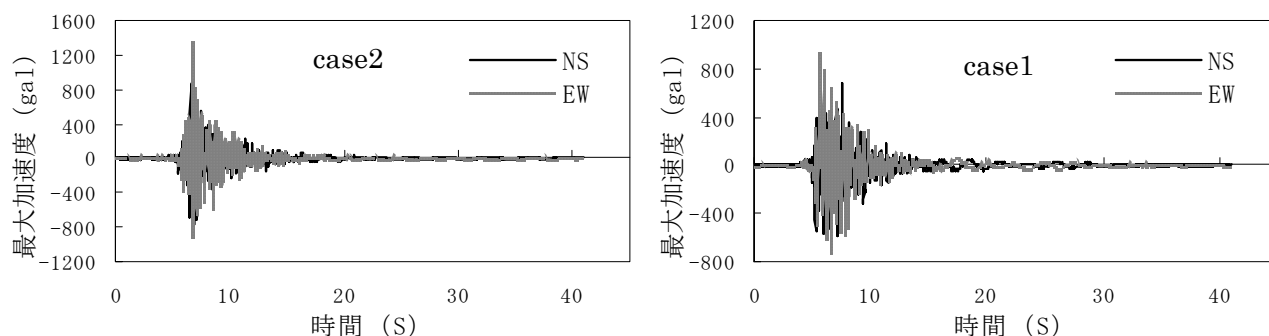


図 2-9 対象となる位置に相当するメッシュで予測された波形(右は破壊開始点 1, 左は破壊開始点 2)

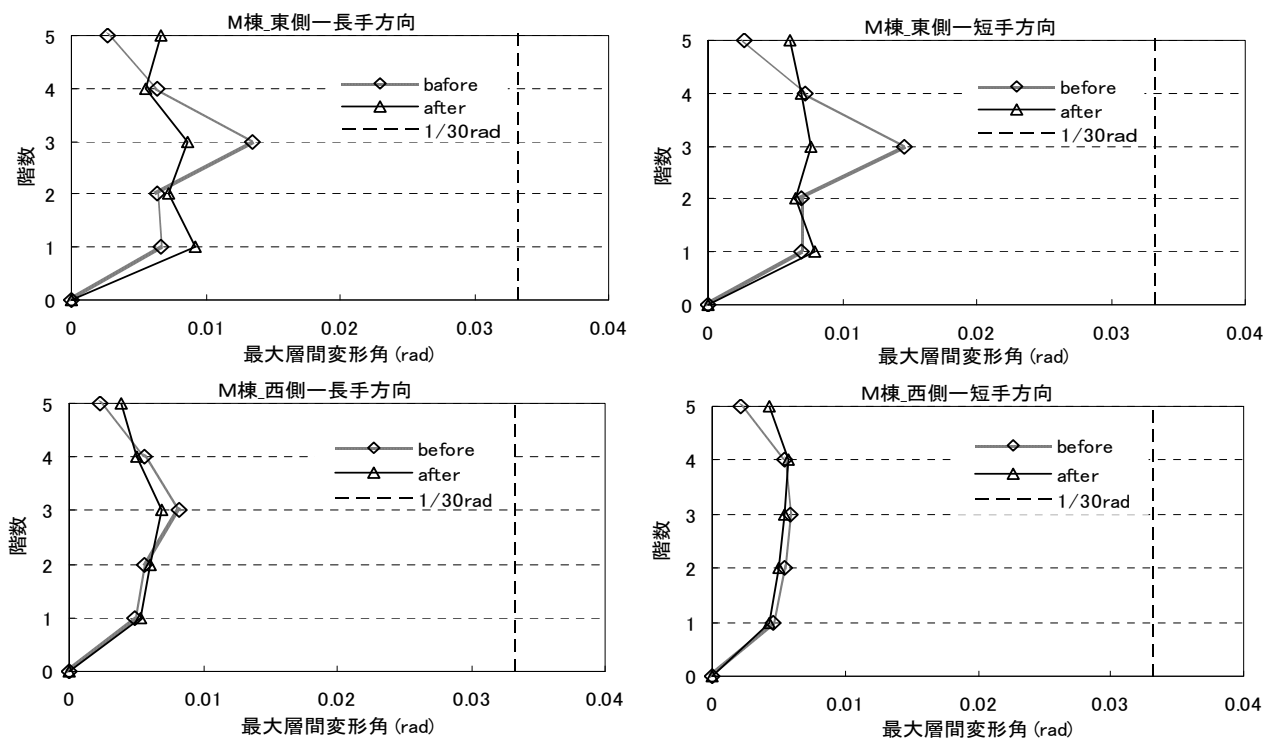


図 2-10 本館 M 棟（南棟）の耐震補強前後の相対層間変形角応答の比較

大きく下回ることがわかった。なお長手と短手の各方向の剛性の違いは表 3・表 4 に示した剛性およびそれに比例する耐力においては特に西側で差があり、短手の方が大きい、応答でみる限り大きな差は生じていない。

図 2-11 の示している通り、センター棟には最大層間変形角分布において耐震補強前後の振動解析モデルにおいてともに 1 階の応答が大きいことがわかる。また構造補強しなかった 3 階においては振動解析モデルの長手方向の剛性が耐震補強前より低くなったところもあり、逆に重量が大きく増えて、最大層間変形角応答は耐震補強前より大きくなったが、大破ながっていたので、微動観測による共振振動数および剛性の差を比較することが難しい。観測された結果からは隣の建物の影響を受けていたと推測されるので、その建物の共振振動数、すなわち建物剛性を耐震補強による振動数変化として議論するのは難しい。建物の耐震性の検討を行う場合は建物の強さ（剛性）や建物の粘り（変性能力）から考えることが基本である。特に、鉄鋼造建物の場合は、耐震補強後の耐震性については剛性の増加から議論することが難しいと言われている。黄檗断層による宇治キャンパス位置におけるメッシュで想定された強震動をセンター棟の振動解析モデルに入力したときの各層の最大加速度応答分布を図 10 に示す。その最大応答を示している 1 層の層間変形角時刻歴応答においては、短辺方向の補強前・補強後で有意な差は見られない。ピークを示した最大変形角より小さいところに残留変形が生じているが補強後の残留変形が補強前より大きくなっていることがわかる。長辺方向の補強後においては最大層間変形角時刻歴応答が補強前より小さい。ピークを示した最大変形角に近い残留変形が生じ、補強前後に有意な差は見られないが短辺方向モデルの残留変形角より大きいことがわかった。大破クライテリオンである最大層間変形角 1/30rad を超えていないことがわかった。そのほかは耐震補強後の最大層間変形角の応答が耐震補強前より小さくなっていることがわかる。これは剛性が上がったことと、耐震補強工事の効果が出ていること

と考えられる。センター棟のような独立した構造物の耐震補強前後の微動観測による共振振動数および剛性の差を比較することができた。一方、本館は耐震補強工事前に相互に縁がつたので、微動観測による共振振動数および剛性の差を比較することが難しい。観測された結果からは隣の建物の影響を受けていたと推測されるので、その建物の共振振動数、すなわち建物剛性を耐震補強による振動数変化として議論するのは難しい。建物の耐震性の検討を行う場合は建物の強さ（剛性）や建物の粘り（変性能力）から考えることが基本である。特に、鉄鋼造建物の場合は、耐震補強後の耐震性については剛性の増加から議論することが難しいと言われている。黄槩断層による宇治キャンパス位置におけるメッシュで想定された強震動をセンター棟の振動解析モデルに入力したときの各層の最大加速度応答分布を図 10 に示す。その最大応答を示している 1 層の層間変形角時刻歴応答においては、短辺方向の補強前・補強後で有意な差は見られない。ピークを示した最大変形角より小さいところに残留変形が生じているが補強後の残留変形が補強前より大きくなっていることがわかる。長辺方向の補強後においては最大層間変形角時刻歴応答が補強前より小さい。ピークを示した最大変形角に近い残留変形が生じ、補強前後に有意な差は見られないが短辺方向モデルの残留変形角より大きいことがわかった。

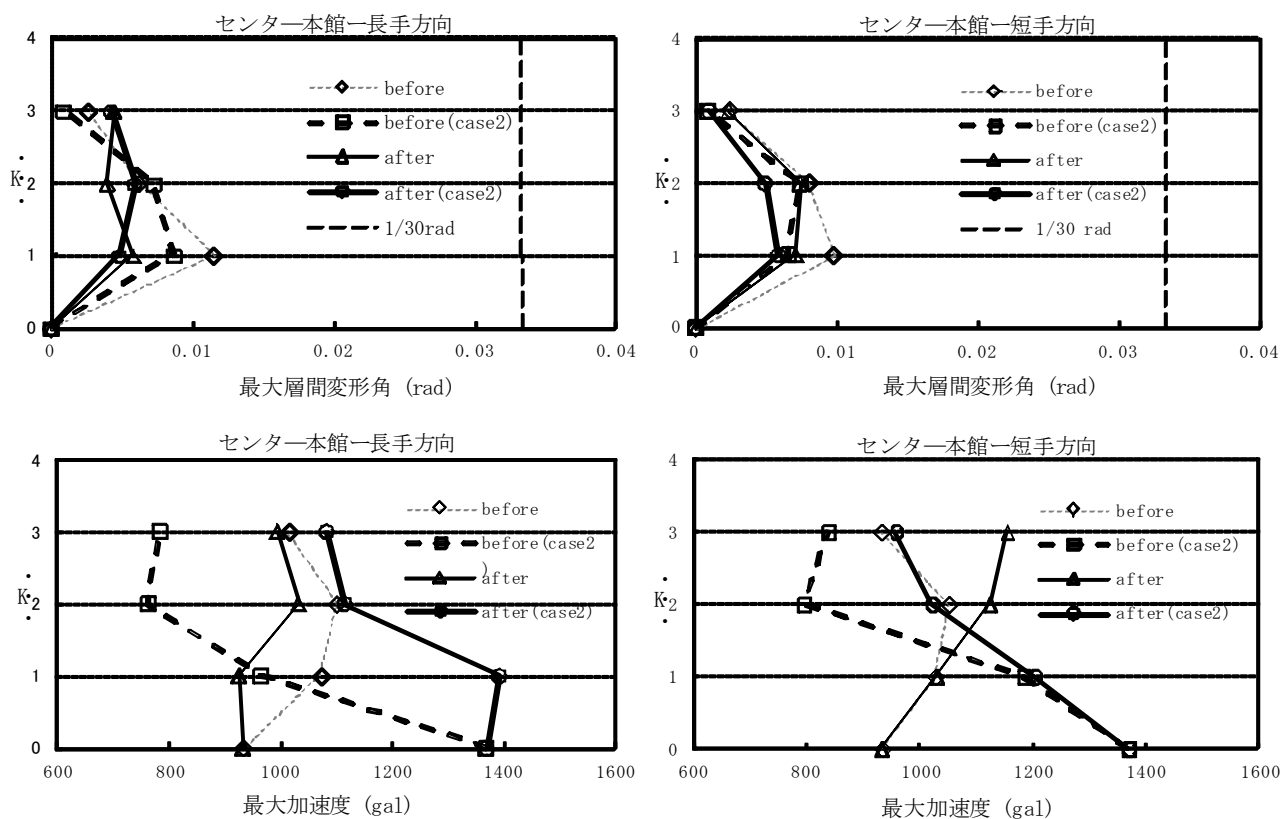


図 2-11 センター棟の耐震補強前後の相対層間変形角応答の比較

2.6 本章のまとめ

耐震改修工事を実施したセンター棟および本館については M 棟を主たる対象にして、耐震補強工事前後に微動観測を行い、その工事前後の振動特性を抽出して比較を行った。実測データと改修図面から構造物の振動解析モデルを構築し、京都大学宇治キャンパスの東縁に存在する黄檗断層系の地震による想定強震動を入力し、非線応答解析を行った。耐震補強工事前後の振動解析モデルによる応答を比較することにより、耐震補強の有効性を検証した。その主な結果は以下のとおりである。

- 1) 耐震改修前に接続していた本館（鉄鋼造 5F）M 棟は、共振振動数（特に短辺方向）が観測点で異なっていたが耐震改修後の建物は、観測点ごとの同じ方向の共振振動数はよく一致した。これは改修前には他の建物との剛接合されていたことによる影響であると考えられる（改修後では、エキスパンションジョイントで切り離された）。耐震改修前に独立していたセンター棟（鉄筋コンクリート造 3F）は、共振振動数が異なった方向で差を見られたが耐震改修後の建物は、観測点ごとと両方向の共振振動数はよく一致した。
- 2) 本館の M 棟の微動計測による耐震改修前後の共振振動数の比較では、耐震改修後の振動数は耐震改修前より低いかほぼ等しいということが分かった。センター棟の微動計測による耐震改修前後の共振振動数の比較では、耐震改修後の振動数は耐震改修前より高くなったことが分かった。
- 3) 非線形応答解析により耐震改修の有効性を検討したところ、耐震改修後のモデルでは各階応答で見ると、それが大きくなった場合と小さくなった場合があるが、M 棟の東側のモデルでは 1 階の応答は耐震補強前より大きくなっているものの最大応答は減少し 2～5 階の応答が平準化するという点に耐震補強効果が表れ、西側のモデルでは補強前後で各階の最大層間変形角応答はほぼ同じか一部で小さくなるという、一見補強効果の明瞭でない結果となった。設計図書によれば、補強後の質量が増大しており、それにほぼ見合う形で剛性も増加しているので、共振振動数や応答解析結果には明瞭に表れてきてはいないが、モデルとしては耐震補強の効果を反映したモデルとなっており、その補強効果はシミュレーション応答結果にも表れているものと推察される。センター棟のモデルでは長手方向 Case1 の時耐震補強なしの 3 階の応答は耐震補強前より大きくなっているものの最大応答やその他の階は応答減少し、耐震補強効果が表れているという。
- 4) 耐震補強前後の解析モデルについて各層の層間変形角分布を示したところ、最大でも $1/100\text{rad}$ に留まり、大破クライテリオンである最大変形角 $1/30\text{rad}$ を超えないことがわかった。また、本館 M 棟の短手方向は長手方向より剛性および耐力があるが、応答結果には大きな差が生じないことがわかった。
- 5) センター棟や本館 M 棟は、改修をしてもしなくても、その東側を走っている黄檗断層系における想定地震程度のレベルの地震動では大破・倒壊に至るような大被害は生じないものと推定された。
- 6) センター棟と M 棟西側のような独立した状況のもとに、耐震補強工事前後に微動観測を行い、その前後の振動特性を抽出して比較することにより、耐震補強効果を定量的に評価する手法はある程度有効であることがわかった。ただし、微動で把握できるのは質量と剛性の比の変化に過ぎないので、設計資料により補強に伴う質量の増大をきちんと評価することが非常に重要であることが指摘できる

第2章の参考文献

- [2-1] 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，建設省建築研究所，1996.
- [2-2] 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 鉄筋コンクリート造建築物，日本建築学会，1997.
- [2-3] 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 鉄骨造建築物/シェル・空間構造/容器構造，日本建築学会，1997.
- [2-4] 香川敬生，大西良広，岩田知孝，澤田純男：黄檗断層近傍の強震動評価，日本地震学会 2007 年秋季大会，2007. 10.
- [2-5] 国土交通省ホームページ：建築物の耐震改修の促進に関する法律（平成7年法律第123号），1995. 10.
- [2-6] 住宅・建築物の地震防災推進会議：住宅・建築物の地震防災対策の推進のために，2005. 6.
- [2-7] 東京都防災ホームページ：首都直下地震等による東京の被害想定，2012. 4.
- [2-8] 中央防災会議：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第一次報告），2012. 8 .
- [2-9] 京都大学ホームページ：京都大学施設の耐震性能(改訂版)，2010. 3.
- [2-10] 大塚健太，永島弘土，藤原覚太：耐震改修建物の振動特性変化の観測とその評価，キャップストーン&自主企画プロジェクト成果報告会，京都大学工学部地球環境工学科，2008. 1.
- [2-11] 宝音図，川瀬博，那仁満都拉：地域別の建物振動特性を考慮した被害予測モデル構築手法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol. 74，No. 642， pp. 1433～1441，2009. 8.
- [2-12] 長戸健一郎，川瀬博：建物被害データと再現強震動による RC 造建物群の被害予測モデル，日本建築学会構造系論文集，第 544 号，pp. 31～37，2001. 6.
- [2-13] 長戸健一郎，川瀬博：鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，pp. 101～106，2002. 9.

第3章 東北地方太平洋沖地震による強震動と構造物破壊能

3.1 はじめに

3.2 観測強震動記録及びその特性

3.3 観測強震動の構造物破壊能

3.4 推定震源モデルによる再現強震動

3.5 再現強震動の構造物破壊能

3.6 本章のまとめ

第3章の参考文献

3.1 はじめに

2011年3月11日14時46分、太平洋三陸沖から茨城沖に渡る広い領域を震源とした超巨大地震（M9.0）が発生した。気象庁の震度分布からは、震度7となったのは宮城県の栗原市のK-NET築館（MYG004）だけであったが、震度6強となった観測点は、気象庁（JMA）観測点・自治体震度計を含め、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の4県37市町で40地点に及んだ。しかし、主としてその後襲った巨大津波により、2万弱の死者・行方不明者が生じ、建物被害は全壊128,527棟に及び、東日本の太平洋沿岸を中心に壊滅的な被害がもたらされた。気象庁は、国内観測史上最大規模の地震であったこの地震を「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」（The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake）と命名した。また、この地震による災害について「東日本大震災」と呼ぶことが閣議決定された^[3-1]。

この地震による津波被害を免れた地域での被害調査では、非常に大きな加速度が記録されたにも関わらず、揺れによる大きな建物被害は少なかったことが報告されている^[3-2]。地震による構造物の大破、倒壊といった大被害は、構造物に作用する揺れ方（地震動）と構造物が耐えられる耐力（耐震性能）との相対関係によって決まる。従って、最新の強震動評価手法に基づき、発生が最も懸念され連動破壊する可能性もある南海トラフ沿いの海溝型巨大地震である東海・東南海地震と南海地震の単独および連動発生時の強震動および被害シミュレーションを定量的に行うことは今後の都市防災対策上極めて重要である。その際に2011年東北地方太平洋沖地震の強震動を再現することによって強震動予測手法の検証を行うことが重要である。同様に、過去の地震における建物被害の生成原因を地震被害調査によって明らかにすることも被害予測モデルの検証上極めて重要である。

そこで本章では、東北地方太平洋沖地震で得られた本震の強震観測記録を分析し、その構造物破壊能を構造物群の非線形応答解析によって被害率を予測する長戸・川瀬建物群モデル^[3-3~3-5]で評価し、その建物被害が比較的軽微なレベルにとどまった理由を観測された地震動の分析によって考察する。さらに、本研究の南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の強震動評価に用いる手法の検証として、過去の地震記録を統計的に処理して作成した長周期（10秒）まで有効な統計的グリーン関数^[3-6]を用い、佐藤^[3-7]らが作成した2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルを用いて、本震の強震波形を再現する。さらに、この波形に対しても同様の方法で構造物破壊能を求め、実際に観測された地震動による推定建物被害率や建物調査を行った観測点の観測被害^[3-8]との対応関係を比較する。

3.2 観測強震動記録及びその特性

2011 年東北地方太平洋沖地震は、日本周辺で発生した地震としては有史以来最大規模のものであり、広範囲での断層に沿って稠密な観測網により強震記録の得られた初めての M9 クラスの地震である。図 3-1 に気象庁を基に作成した全国の震度分布図^[3-9]を示す。★印は本震の震央位置を示す。その震度分布からは、震度 7 となったのは宮城県の栗原市の K-NET 築館だけであったが、震源断層面が数枚間にわたり連動し、極めて大きかったことにより、強い揺れを観測した観測点が非常に広範囲にわたっている。震度 6 強となった観測点は、気象庁（JMA）観測点・自治体震度計を含め、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の 4 県 37 市町で 40 地点に及んだ。さらに震度 5 弱となった観測点をみると、東北地方及び関東地方の大部分を含む極めて広い地域で観測された。観測された地震動（防災科学技術研究所の強震観測網^[3-10]K-NET、KiK-net の観測点）の最大加速度が（地表水平成分のいずれか）おおよそ 1000Gal を超えるのは宮城県から千葉県にかけての広い範囲で 14 地点にも及んだが、最大加速度に対して最大速度が小さい傾向が見られ、相対的に短周期成分が卓越する地震動であった。また、最大加速度が極めて大きかったことに加え、複数のセグメント（震源断層面）が数枚にわたり連動して破壊したため、過去の地震と比べ地震動の継続時間が非常に長く、すなわち揺れの繰り返し回数が多かったことが特徴として挙げられる。具体的に言えば、観測された地震動波形では宮城県以北の加速度波形の形状は振幅が大きい時間帯が 2 つあるのに対して、福島県以南では 1 つにまとまっている傾向が見られた^[3-9]。図 3-2 には、震度 7 が観測された K-NET 築館観測点と震度 6 強が観測された K-NET 石巻観測点の加速度波形の NS、EW 方向とその速度応答スペクトルを示す。

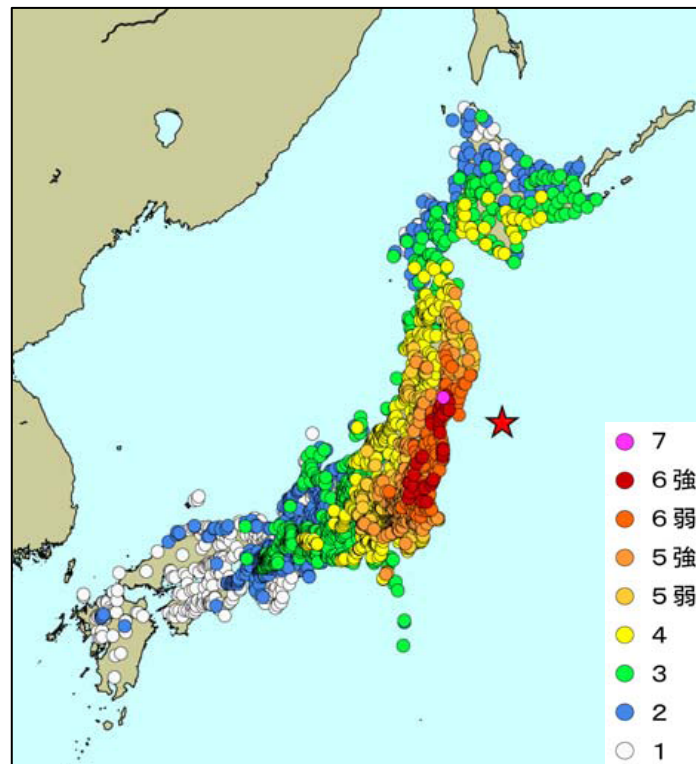


図3-1 東方地方太平洋沖地震の震度分布（佐藤，2011）

2011 年東北地方太平洋沖地震の観測点で得られた強震動波形の特徴を調べるために、防災科学技術研究所の強震観測網^[3-10]（K-NET, KiK-net）で震度 6 弱以上が観測された 62 観測点の NS、EW 方向の擬似速度応答スペクトルを求めた（減衰定数 5%）。図 3-3 には擬似速度応答スペクトルとその平均値±標準偏差を示す。縦軸は、擬似速度応答スペクトルを、横軸は地震動の周期範囲を示す。また、大きな被害をもたらした 1995 年兵庫県南部地震の JMA 神戸観測点の速度応答スペクトルも重ね書いた。兵庫県南部地震の JMA 神戸の応答スペクトルの周期 0.5～2 秒では東北地方太平洋沖地震の計測震度が大きかった観測点で観測された地震動の平均速度応答スペクトルの 2 倍ほどのレベルとなっていることがわかる（図 3-2、ピンク色矢印で示している範囲）。すなわち、東北地方太平洋沖地震では、いわゆる中・低層建物に最も危険な「やや短周期」（0.5～2 秒）地震動が卓越していなかったことがわかる。

この地震により、予想外に軽微であった建物被害の生成原因を別の観点から考察する。図 3-3 には、2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動波形を対象として、これまで強震観測値と被害との関係を考察するのに用いられてきた最大加速度-等価卓越振動数ダイアグラムを示す^[3-11]。縦軸には地震動最大加速度、横軸に等価振動数＝最大加速度÷（最大速度×2π）を示す。これまで大破・倒壊を出した地震動レベルから見ると、等速度ラインで 100cm/s 以上、等加速度ラインで 800Gal 以上の領域が大破以上の被害が出る危険ゾーンとなる。すなわち、図 3-4 に赤点線で示している範囲である。この図から、今回の地震の観測値は最大加速度が大きな記録ではすべて卓越振動数が 1Hz 以上であり、1Hz を中心とした危険な「やや短周期」（0.5～2 秒）からは外れていることが分かる。またどの地点でも最大速度 100cm/s を超えないことが分かる（ただし、等価振動数が 4Hz 以上の K-NET 築館、MYG004 だけ例外）。

図 3-3 から、震度 6 強以上の観測点では、最大速度に対して最大加速度が大きい傾向が見られることがわかる。言い換えるとその卓越振動数は高振動数となっている。したがって、揺れによる建物被害が少なかったとすれば、それは東北地方の建物耐震性が高かったためというよりは（もちろんその可能性を否定できる材料があるわけではないが）、木造住宅や中低層の建築物に大きな被害を与える「やや短周期」の地震動があまり強くなかったことが原因であると推察できる。境ら^[3-12]の研究にも、多くの観測強震記録で 1 秒以下の短周期が卓越していて、建物の大きな被害に結びつく周期 1～2 秒の応答はさほど大きくないと報告されている。この強震動の性質に鑑みると、今回建物被害が少なかった理由は必ずしも東北地方の建物が他の地域に比して特に耐震対策が充分に進んでいたため、あるいは高い耐震性能を有していたためではないと考えられる。このことは、近未来に発生するであろう想定地震における建築物被害を定量的に想定するためには、単純な最大値指標ではなく地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をすることが重要であることを示している。

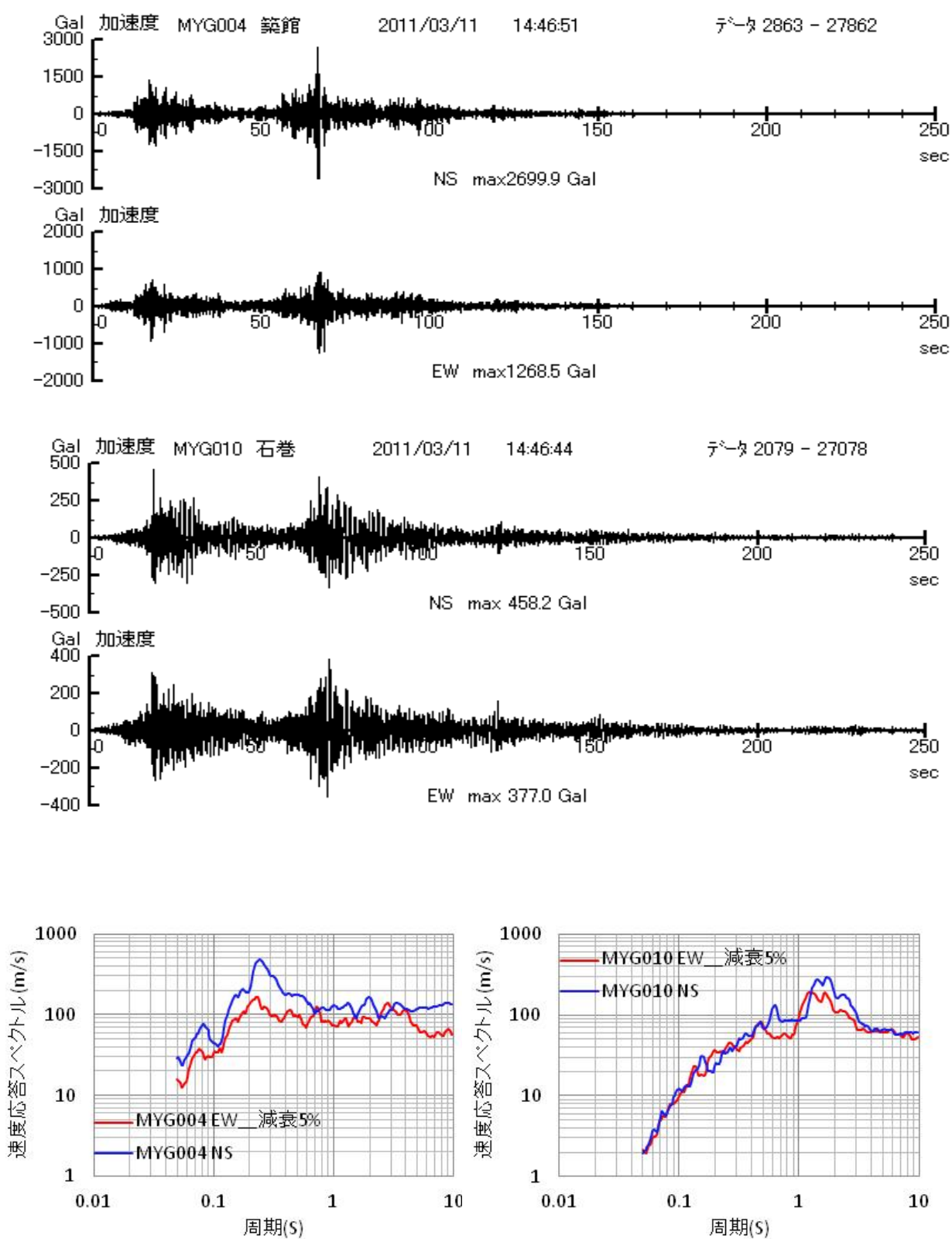


図 3-2 加速度波形の NS、EW 方向とその速度応答スペクトル

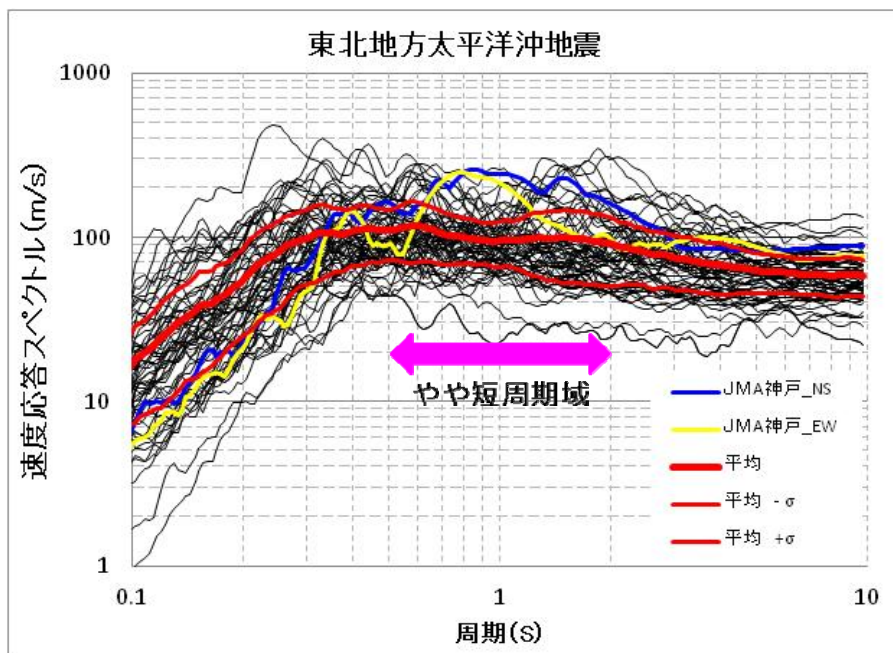


図 3-3 擬似速度応答スペクトルを求めて平均値と平均値±標準偏差

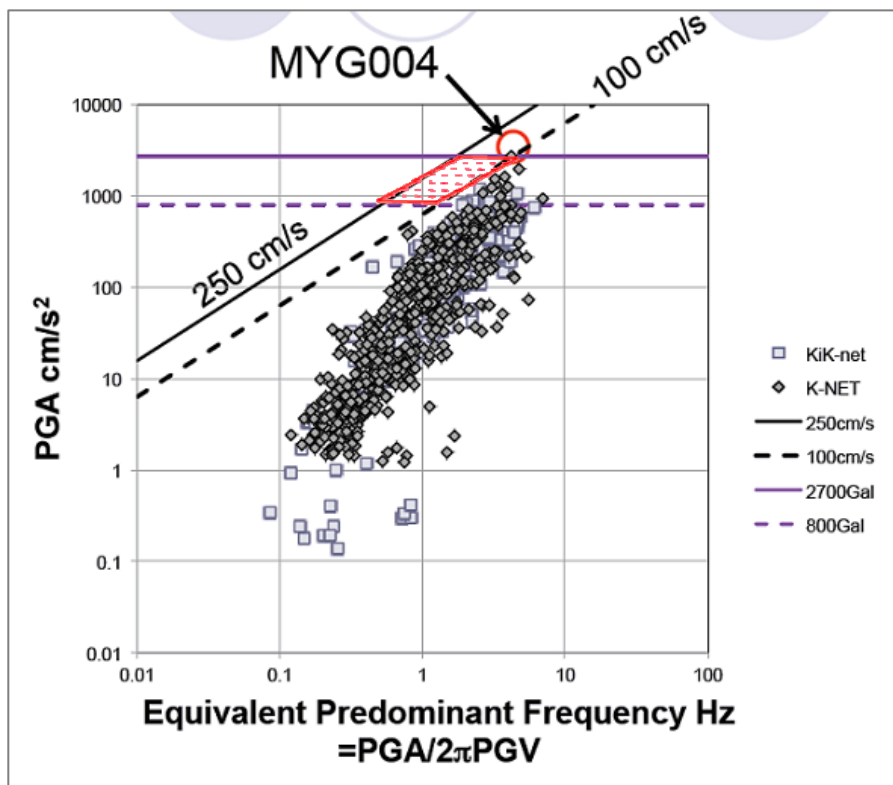


図 3-4 最大加速度-等価卓越振動数ダイアグラム (Kawase, 2011)

3.3 観測強震動の構造物破壊能

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震は、日本列島のある陸側のプレートとその下に沈み込む太平洋プレートの境界で発生した海溝型地震で、マグニチュード M9.0 という日本観測史上、最大規模の巨大地震であった。この地震では、地震動による被害と震源域に近い沿岸地方における大津波被害があり、特に沿岸地域の建物について被害が揺れによる被害より津波被害が支配的であり、同地域での地震動被害については、よくわかっていない。地震に対する理解がまだまだ十分でないことを人々に再認識させ、人知を超えた地震に対する社会システムの脆弱性が浮き彫りにされた。さらに 2011 年東北地方太平洋沖地震の起こり方・地面揺れ（地震動）・津波の特徴を詳細に分析・把握し、その知見を将来の発生が危惧される地震に対する備えに活かしていくことが大変重要である。

本節では、この 2011 年東北地方太平洋沖地震によってもたらされた広域での建物被害を概略把握ために、K-NET、KiK-net 及び JMA の観測点で観測された強震データのうち、水平成分のいずれかがおよそ 200Gal を超える観測記録を用いて、長戸・川瀬建物群モデルによりその建物破壊性能を計算し、旧耐震、新耐震、構造別や階数ごとの建物の観測地点の予測被害率分布を計算した^[3-12]。なお、この被害率解析モデルは、これまでの経験から、入力最大加速度が 200Gal 以上にならないと推定被害率はゼロとなることがわかっているので、200Gal 以上の観測記録のみを用いている。この非線形応答解析モデルの詳細については第 6 章において詳しく説明する。

図 3-5～図 3-10 には最大加速度が 200Gal 以上の観測点及びそこでの観測最大加速度、年代区別なしの木造 2 階建、鉄骨造 3 階、4 階、5 階建や鉄筋コンクリート造 3 階、6 階、9 階、12 階建の旧耐震と新耐震の推定予測被害率分布を示す。○印は最大加速度が 200Gal 以上になっている観測点で、白色の○印は推定計算被害率がゼロであったことを表し、○印の色が濃くなるに従って推定被害率が高くなることを示している。これらの図から、一部の点を除き殆どの地点で推定被害率は 10%以下となっていることがわかる。これは地震動による大きな建物被害は少なかったという報告^[3-2]や第 3 章の第 1 節に示したように観測された地震動の分析特性、木造住宅や中低層の建築物に大きな被害を与える「やや短周期」の地震動があまり強くなかったこととよく対応している。

しかし推定被害率が大きくなる地点が必ずしも震源から近いところではないこと、同じ観測点でも旧耐震と新耐震、構造別、階数ごとにより推定される被害率分布の様相は異なることがわかる。このことは、近未来に発生するであろう想定地震における建築物被害を定量的に想定するためには、地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をすることが重要であることを示している。また、これらの図から、高い予測被害率は地域的には宮城県、福島県及び茨城県の一部に集中し、主として海岸線沿いと、海岸線から 40km～60km 内陸側の細長い帯に集中していることが分かった。耐震性能の低い旧耐震建物は新耐震建物よりも予測被害率が高いこと、構造別では、鉄骨造建物が一番高く、次に木造建物、一番小さいのが鉄筋コンクリート造建物の順となることが分かった。階数ごとでは、鉄骨造建物は階建が高くなると予測被害率は低くなること、鉄筋コンクリート造建物は階数ごとに予測被害率の傾向が明瞭ではないが、9 階建では他の階数の建物より高くなる傾向があることが分かった。ある特定の場所では非常に高い被害率が生じているが、これは最大加速度が大きくなるとそれが結果として剛性の高い良質な構造物の共振を引き起こし破壊と判定される大きな相対層間変形を生じせしめる効果によるものと推察される。

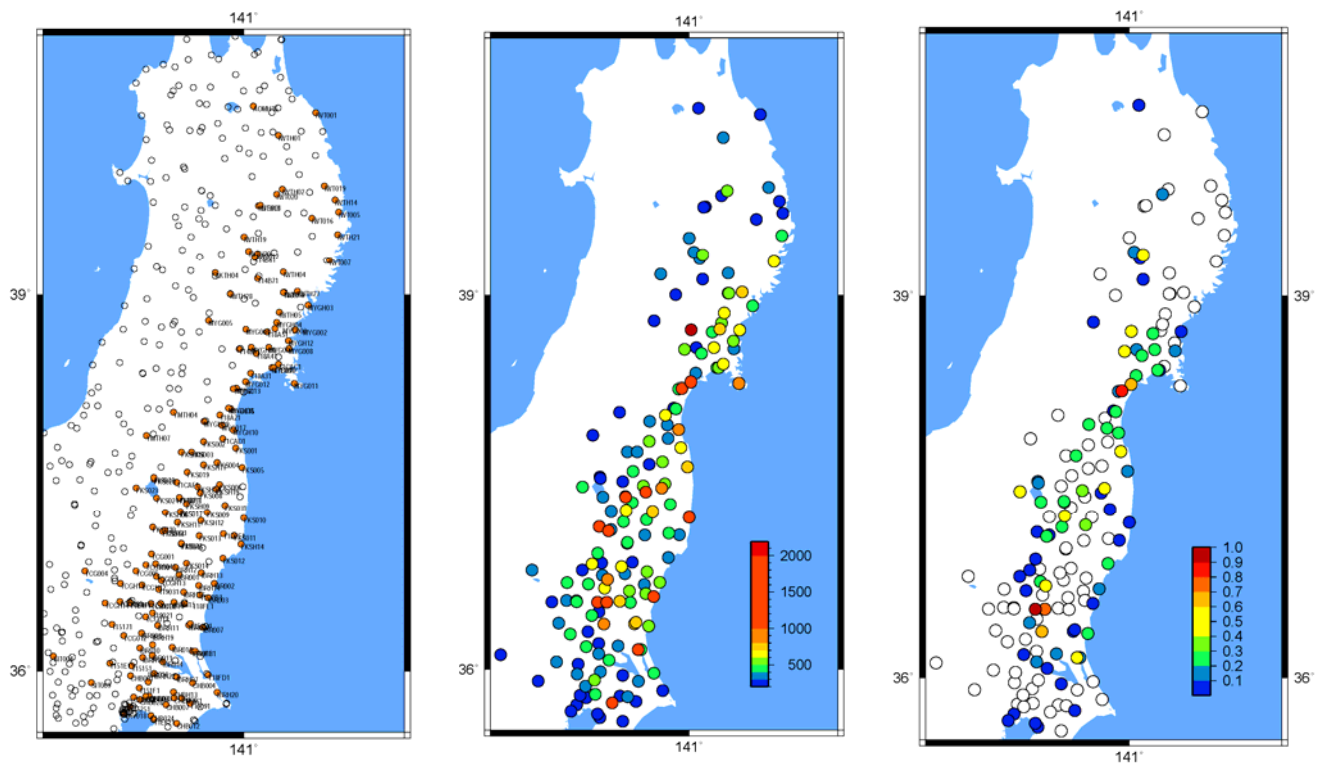


図 3-5 検討対象の観測点、観測された最大加速度（200Gal 以上の観測点）、年代区別なしの木造 2 階建被害率

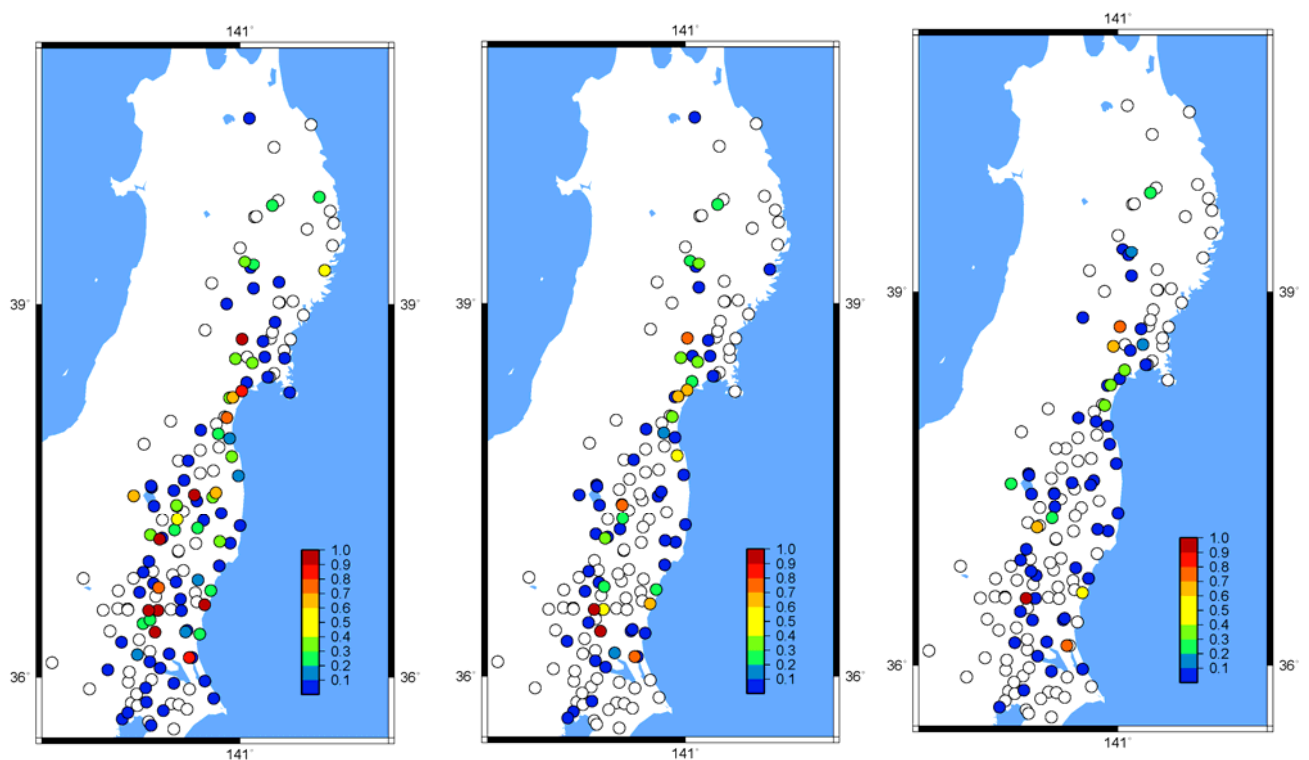


図 3-6 鉄骨造 3 階建被害率（旧耐震） 鉄骨造 4 階建被害率（旧耐震） 鉄骨造 5 階建被害率（旧耐震）

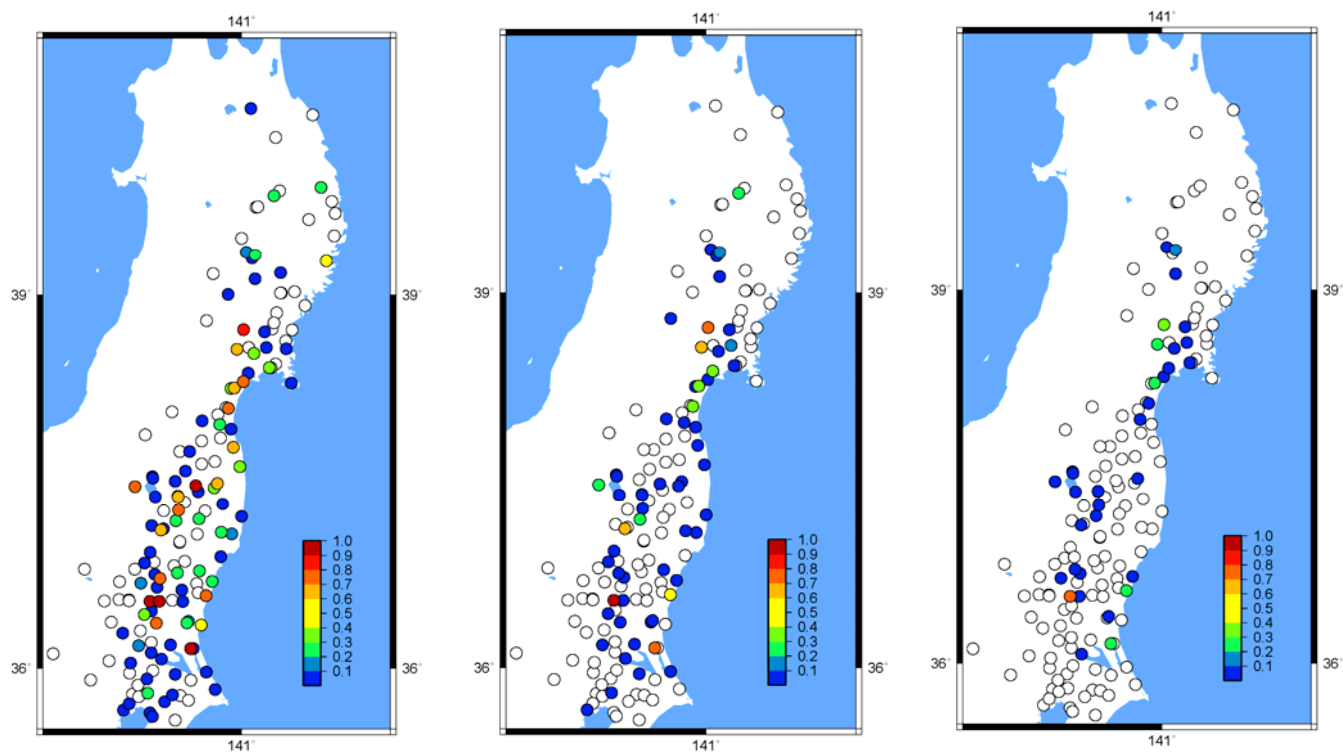


図 3-7 鉄骨造 3 階建被害率 (新耐震) 鉄骨造 4 階建被害率 (新耐震) 鉄骨造 5 階建被害率 (新耐震)

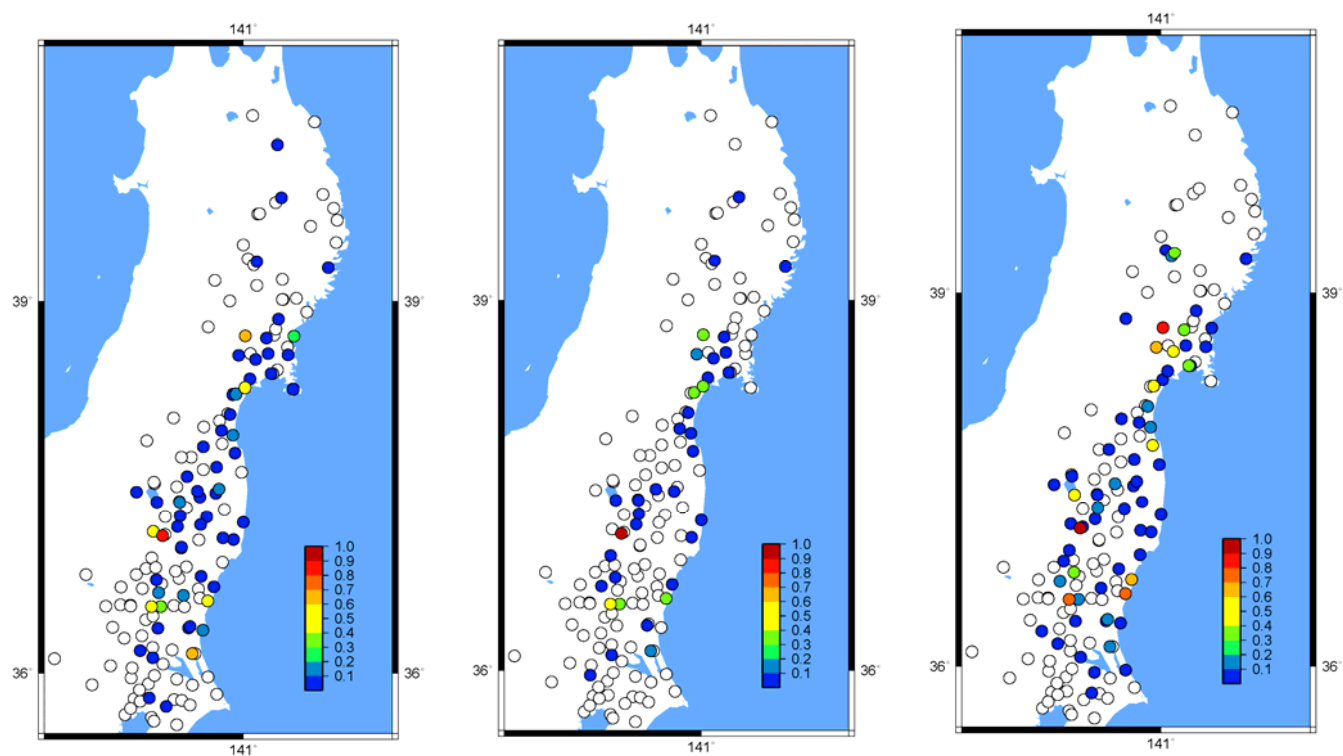


図 3-8 鉄筋コンクリート造 3 階建被害率 (旧耐震) 鉄筋コンクリート造 6 階建被害率 (旧耐震) 鉄筋コンクリート造 9 階建被害率 (旧耐震)

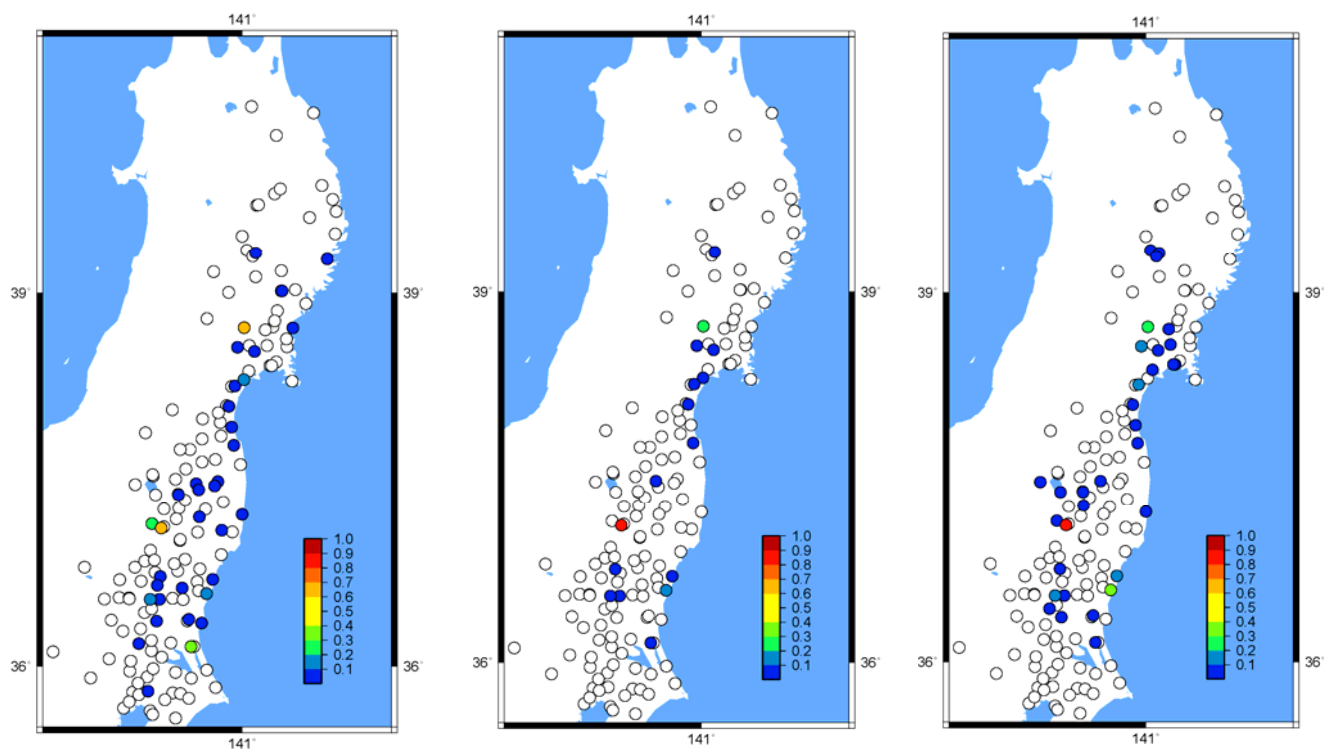


図 3-9 鉄筋コンクリート造 3 階建被害率（新耐震） 鉄筋コンクリート造 6 階建被害率（新耐震） 鉄筋コンクリート造 9 階建被害率（新耐震）

3.4 佐藤^[3-7]らの推定震源モデルによる再現強震動

2011 年東北地方太平洋沖地震とその被害を詳細に分析・把握し、その知見を将来の発生が危惧される地震に対する備えとして生かし伝えていくことが大変重要である。特に、2011 年東北地方太平洋沖地震と類似の震源過程が想定されている東海地震・東南海地震・南海地震の単独および連動型地震に対して、この地震で得られた知見を生かすことは必須である。このような観点から、2011 年東北地方太平洋沖地震の被害調査で得られた知見を踏まえて、近未来の南海トラフ沿いの東海・東南海と南海地震の単独発生や連動発生の場合のシミュレーションを行い、海溝型巨大地震による建物被害を推定することは今後の都市防災対策上極めて重要である。

佐藤^[3-7]は経験的グリーン関数に基づき 2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) に対する強震動生成領域からなる震源モデルを構築した。すなわち宮城県沖に 2 つ、福島県と茨城県の県境の海岸沿いに 2 つの計 4 つの強震動生成領域における震源モデルである。強震動生成領域ごとにより破壊伝播速度が異なっていることと 2 つの強震動生成領域の一部や全域が重なるように設定していることが特徴的である。図 3-11 に 2011 年東北地方太平洋沖地震と経験的グリーン関数として用いる 2 つの地震の震央位置 (気象庁) とメカニズム (F-net) ^[3-13]、検討に用いた強震動観測点の位置を示す。強震動生成領域の探索範囲と推定した強震動生成領域と破壊開始点も示している。経験的グリーン関数法に基づく震源モデルの推定のために選択した北から南に延びる震源域をカバーするように選択した 15 地点の KiK-net 観測点の位置も示す (なおこの図は文献から借用した図である)。

この図にあるように、強震動生成領域 1 と 2 では、図 3-11 の EQ4 (Mw6.4) の地震を、強震動生成領域 3 と 4 では EQ6 (Mw6.8) を経験的グリーン関数として、プレート境界地震の短周期レベルのスケールリング則及び地域性について検討を行っている。表 3-1 に佐藤^[3-7]によって推定された 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデルのパラメーターを示す。

本節では、この 2011 年東北地方太平洋沖地震に対する強震動生成領域からなる震源モデルと包・川瀬^[3-6]が作成した日本全国の内陸地域と海溝付近で起きた比較的大きな 110 個の地震に対して震源特性・伝播特性・サイト特性を分離して求めた地震タイプや地域性を考慮した長周期まで有効な統計的グリーン関数を用いて、これらを Irikura^[3-14]の波形合成法で重ね合わせて、2011 年東北地方太平洋沖地震の広帯域強震動波形の再現を行った^[3-15]。この統計的グリーン関数の詳細については第 5 章に示す。解析地点は東北地方太平洋沖地震の強震動生成領域中心点から 400km 以内の K-NET、KiK-net、JMA 強震観測点であり、東北日本を中心とした領域を対象とした。再現地震動による計測震度から求めた震度分布と気象庁による 2011 年東北地方太平洋沖地震の計測震度分布を図 3-12 に比較して示す。○印は解析点を示す。再現地震動による震度 6 弱以上の計測震度分布は地域的には宮城県、福島県及び茨城県の一部に集中していることがわかる。これは観測強震動による予測建物被害率の高くなった地域とよく対応している。また再現地震動による計測震度は実際の計測震度と良く対応していることが分かる。図 3-13 に再現した東北地方太平洋沖地震による合成波形の最大加速度・最大速度と司・翠川^[3-16]による水平最大加速度・最大速度の距離減衰式との比較を示す。ただし、この場合回帰には東北地方太平洋沖地震のデータは含まれておらず、M は外挿となることに注意が必要である。最大加速度は距離減衰式と概ね一致しているといえるものの、最大速度においては平均的に合成結果が小さい傾向にある。これは周期数秒までの最大速度に寄与する強震動生成領域が相対的に大きいことによるものと考えられる。

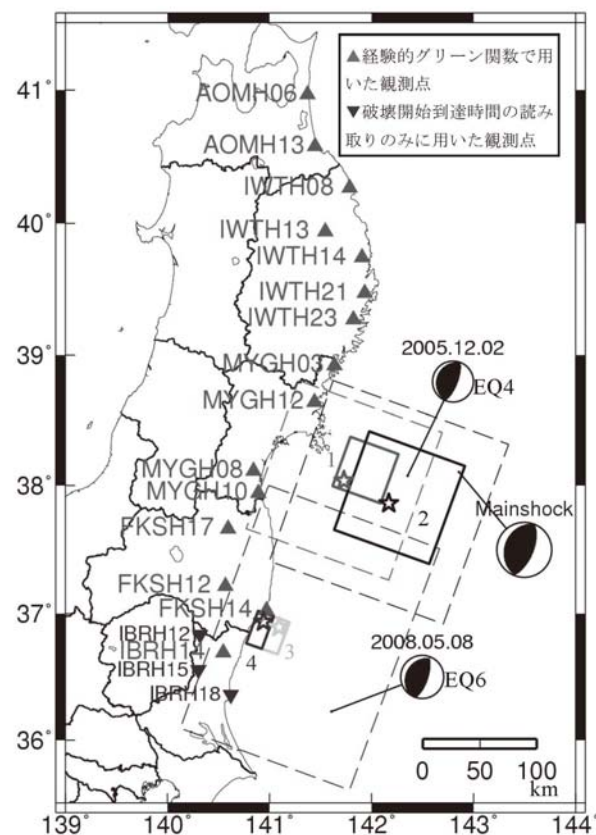


図 3-11 2011 年東北地方太平洋沖地震と経験的グリーン関数として用いる 2 つの地震の震央位置（気象庁）とメカニズム（F-net），検討に用いた強震動観測点の位置強震動生成領域の探索範囲と推定した強震動生成領域と破壊開始点（佐藤，2012）^{〔3-7〕}

表 3-1 推定した震源モデルのパラメーター（佐藤，2012）^{〔3-7〕}

パラメータ		強震動生成領域 1	強震動生成領域2	強震動生成領域3	強震動生成領域4	強震動生成領域全体
長さ {km}		45.0	90.0	30.0	15.0	—
幅 {km}		45.0	90.0	30.0	30.0	—
面積 {km ² }		2025.0	8100.0	900.0	450.0	11475.0
地震モーメント {dyne・cm}		1.49E+28	7.73E+28	3.23E+27	8.06E+26	9.63E+28
応力降下量 {bar}		397.7	258.5	291.0	205.7	—
すべり量 {cm}		1530.3	1989.5	746.6	373.2	—
短周期レベル {dyne・cm/s2}		2.03E+27	2.64E+27	9.90E+26	4.95E+26	3.51E+27
破壊開始点 {s}		28.0	58.0	103.4	107.9	—
破壊伝播速度 {km/s}		3.0	2.0	2.0	2.0	—
破壊開始点	経度 [度]	141.729	142.168	141.093	140.941	—
	緯度 [度]	38.036	37.863	36.892	36.937	—
	深さ [km]	48.0	36.6	50.9	54.8	—
走向		N200° E	N200° E	N200° E	N200° E	—
傾斜角		15度	15度	15度	15度	—

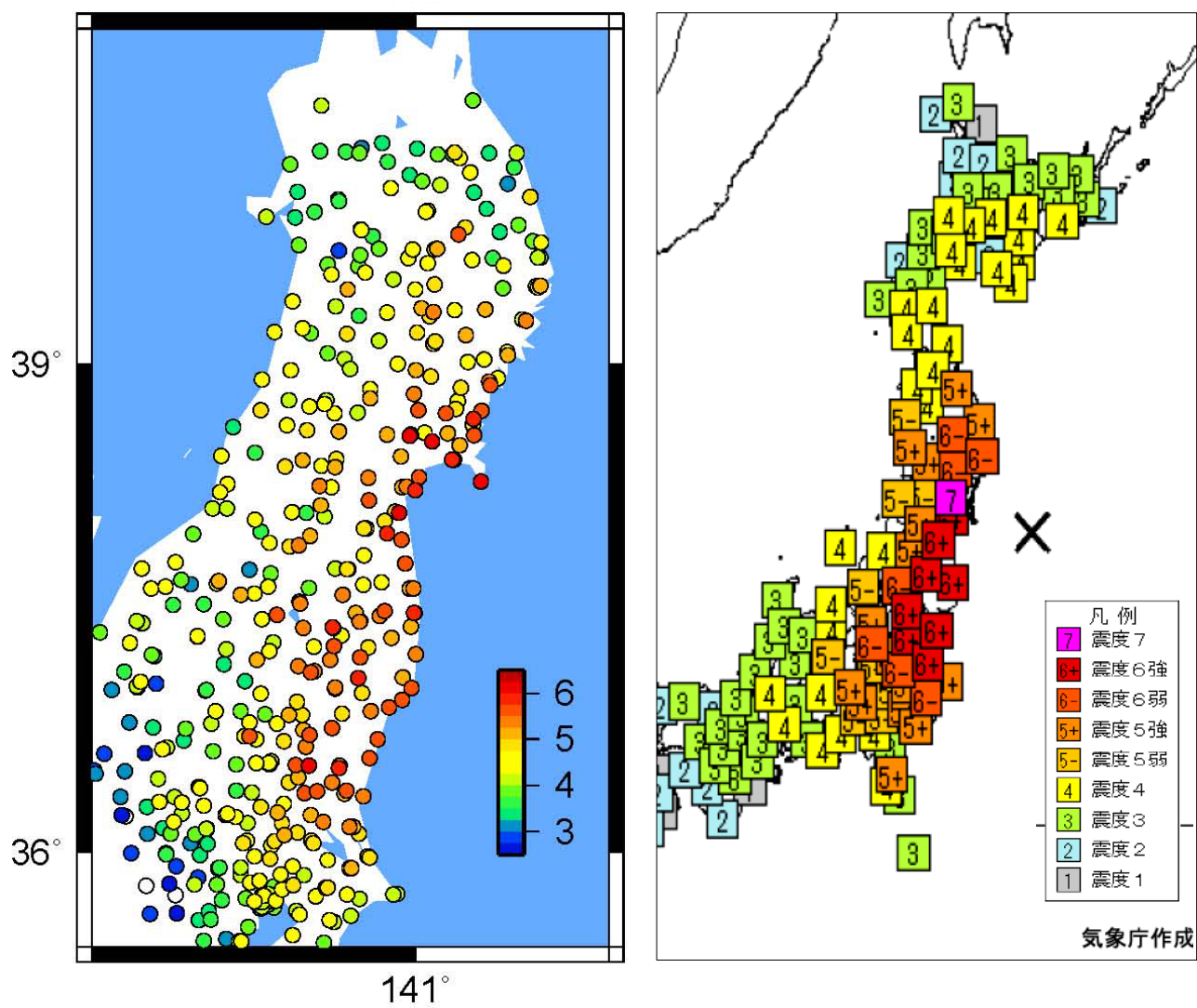


図 3-12 再現強震動による計測震度階と観測強震動による震度分布との比較

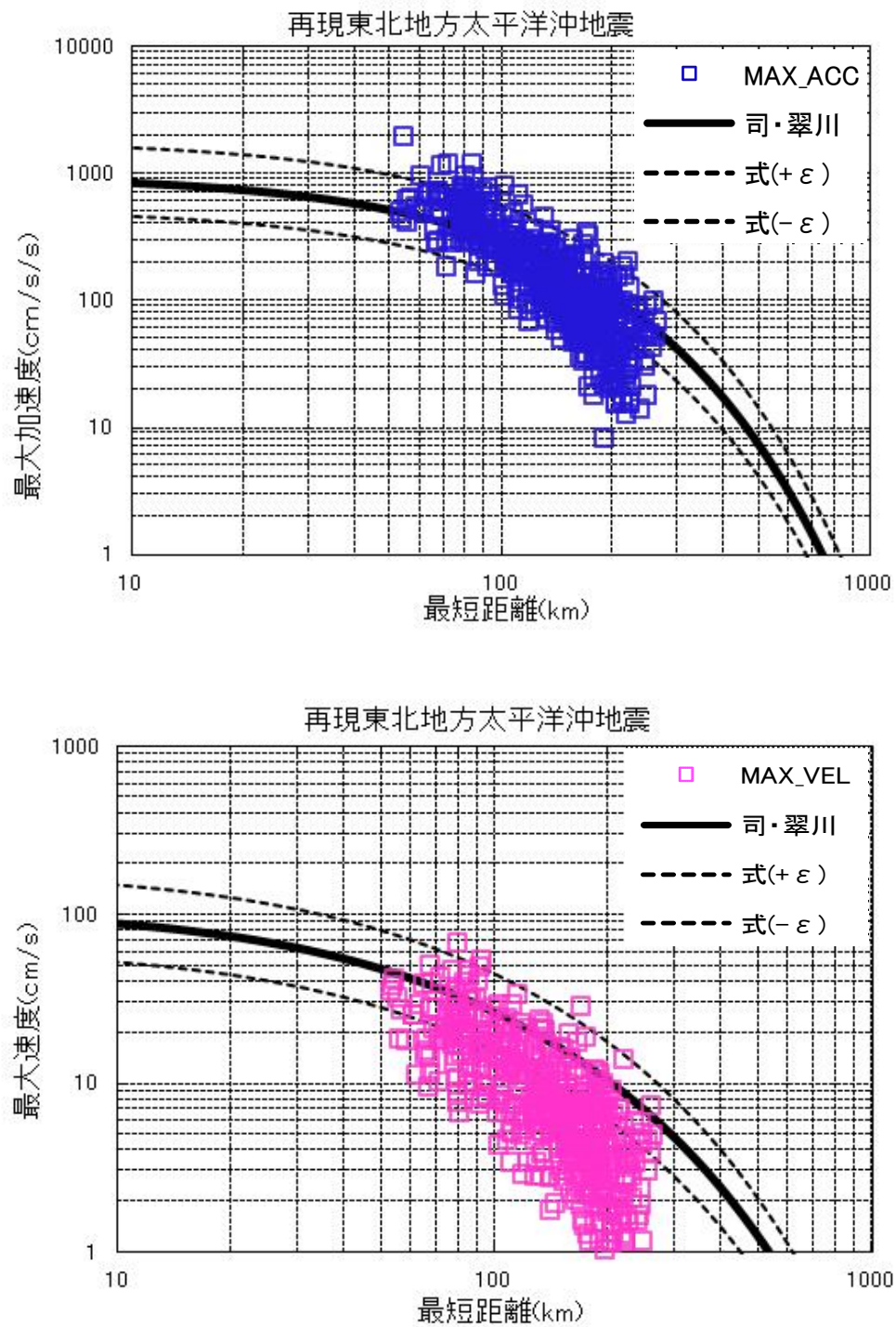


図 3-13 合成波形による最大加速度・最大速度と司・翠川(1999)^[3-16]による
水平最大加速度(上)・最大速度の距離減衰式との比較(下)

3.5 再現強震動の構造物破壊能動の特性

観測記録と同様にして、建物被害率の推定に再現強震動の解析点における 200Gal を超える再現波形を用いて、長戸・川瀬建物群モデルにより、旧耐震／新耐震、構造種別や階数ごとの建物の解析地点の推定被害率分布を計算した。図 3-14～図 3-18 には最大加速度が 200Gal 以上の解析点、年代区別なしの木造 2 階建、鉄骨造 3 階建や鉄筋コンクリート造 3 階・9 階建の旧耐震と新耐震の推定予測被害率分布を示す。図 3-5 と同様に、○印は最大加速度が 200Gal 以上となった解析点で、白色の○印は推定計算被害率がゼロであったことを示しており、色が赤くなっていると推定被害率が高いことを表している。観測強震動による推定被害率の場合よりも解析点は少なくなっている。この図から、観測強震動による推定被害率よりも再現強震動の方が平均的に小さくなっていることがわかる。これは再現強震動の最大速度が多少小さくなっていることと対応しているものと推察される。

推定被害率が大きくなっている解析点は宮城県の海岸沿いの観測点及び陸側の高い震度が観測された解析点に集中している。これらは、境^[3-17]により強震動が観測された観測点での建物被害調査から倒壊・大破がもたらされたとされた観測点とよく対応している。観測強震動による推定被害率と同じように、推定被害率が大きくなる地点が必ずしも震源から近いところではないこと、同じ観測点でも旧耐震と新耐震、構造別や高さにより推定される被害は異なることがわかる。また、推定被害率では地域的にも宮城県、福島県及び茨城県の一部の観測点に被害が計算されており、被害をもたらす地域は非常に広範囲になること、主として海岸線沿いと、海岸線から 40km～60km 内陸側の細長い帯に集中していることが指摘できる。全体として観測強震動による推定被害率分布とよく対応する結果が得られたといえる。

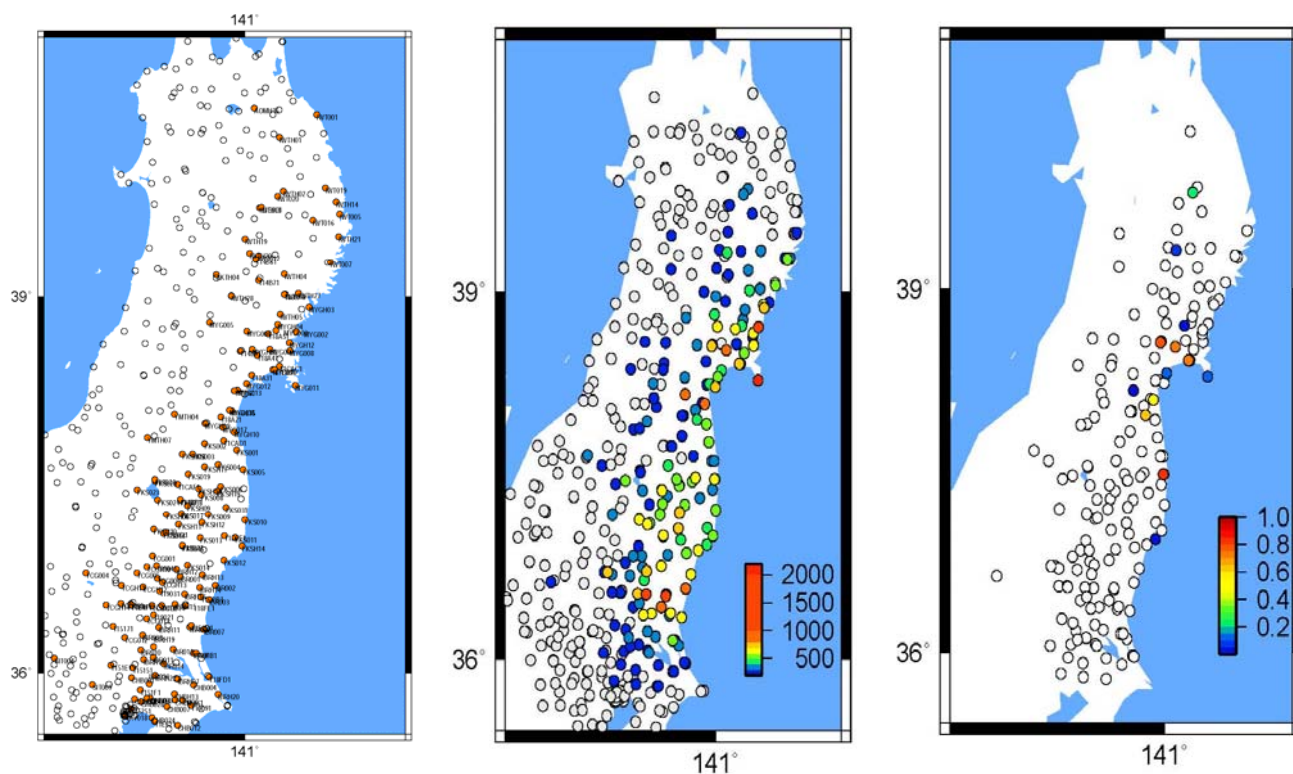


図 3-14 検討対象の観測点 観測された最大加速度（200Gal 以上の観測点）年代区別なしの木造
2 階建被害率

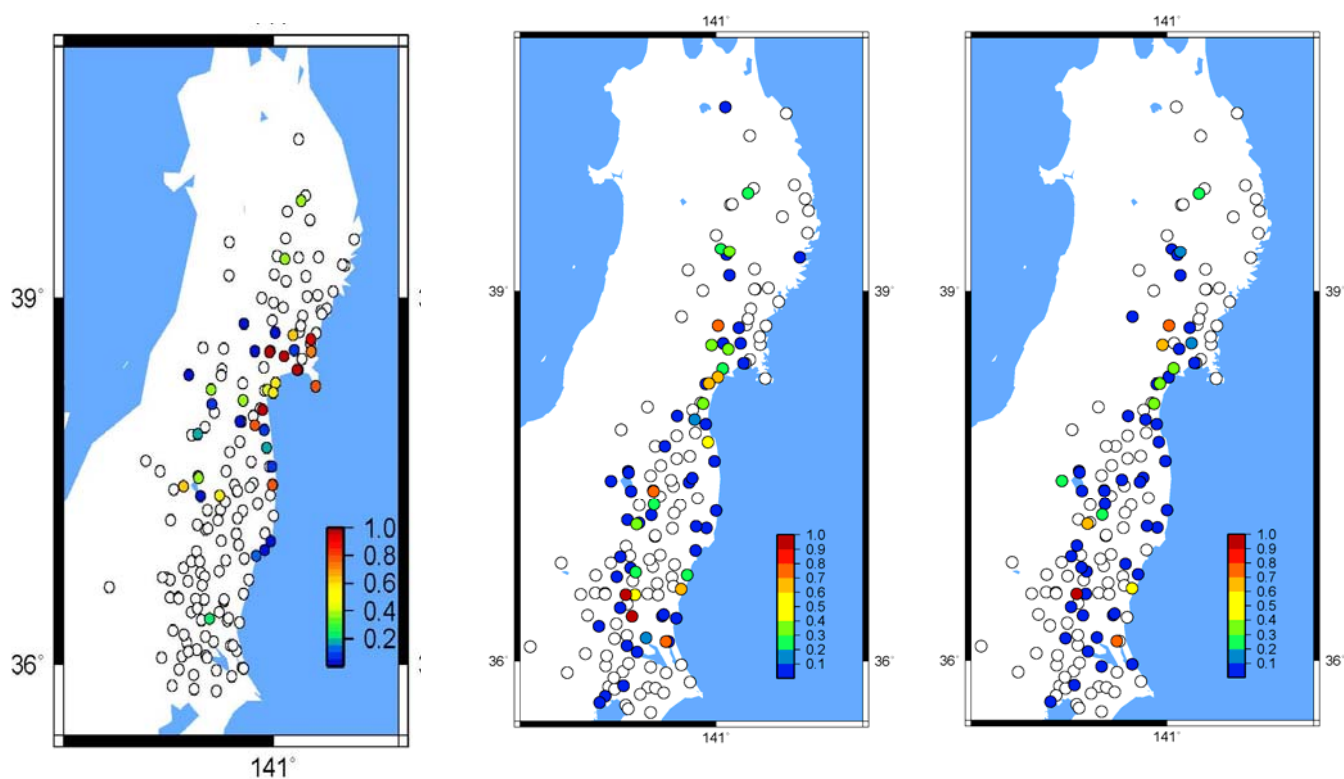


図 3-15 鉄鋼造 3 階建被害率（旧耐震）鉄鋼造 4 階建被害率（旧耐震）鉄鋼造 5 階建被害率（旧耐震）

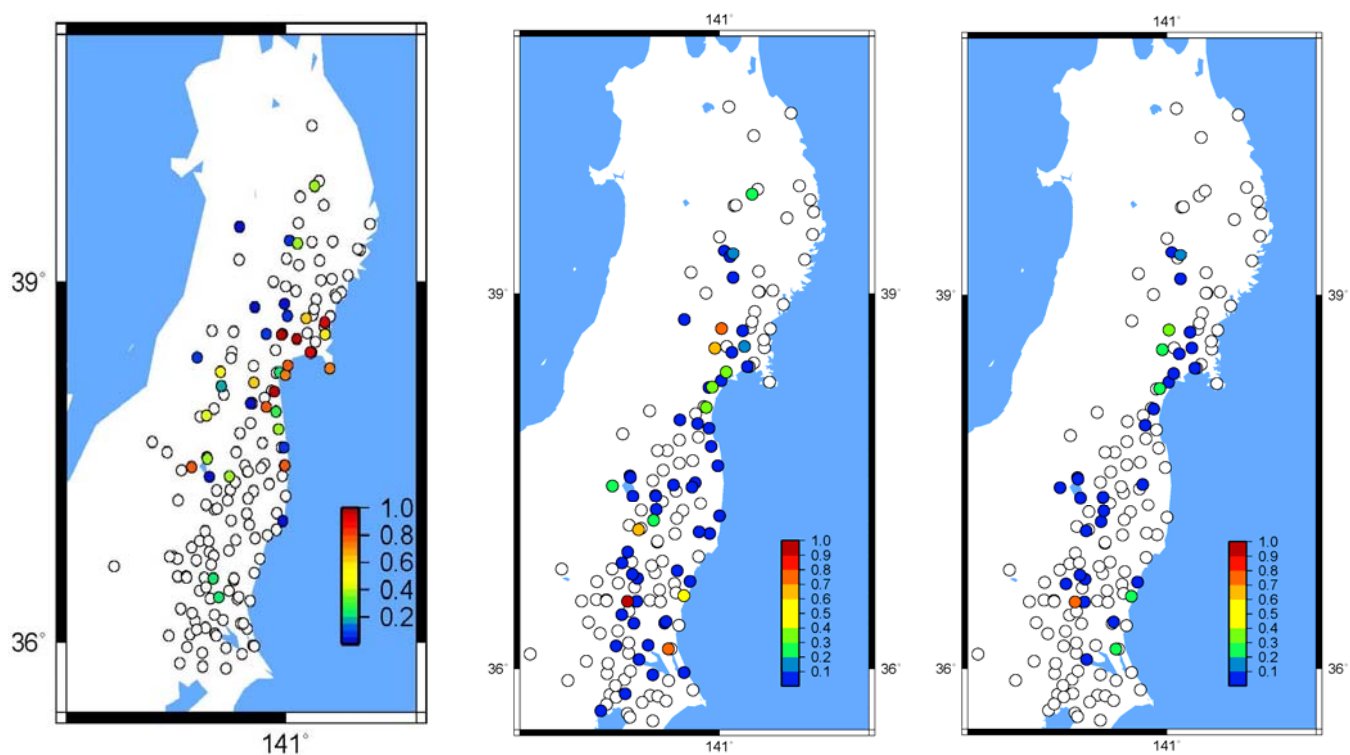


図 3-16 鉄鋼造 3 階建被害率 (新耐震) 鉄鋼造 4 階建被害率 (新耐震) 鉄鋼造 5 階建被害率 (新耐震)

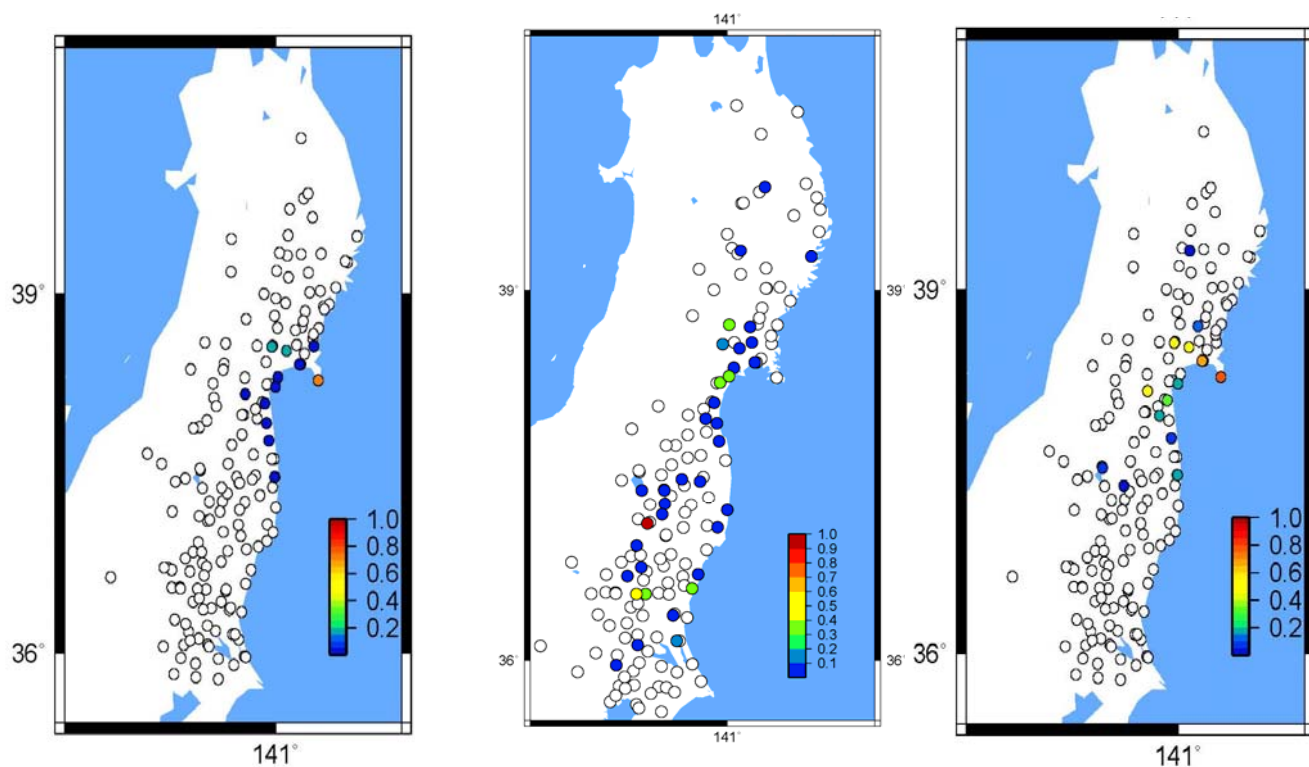


図 3-17 鉄筋コンクリート造 3 階建被害率 (旧耐震) 鉄筋コンクリート造 6 階建被害率 (旧耐震) 鉄筋コンクリート造 9 階建被害率 (旧耐震)

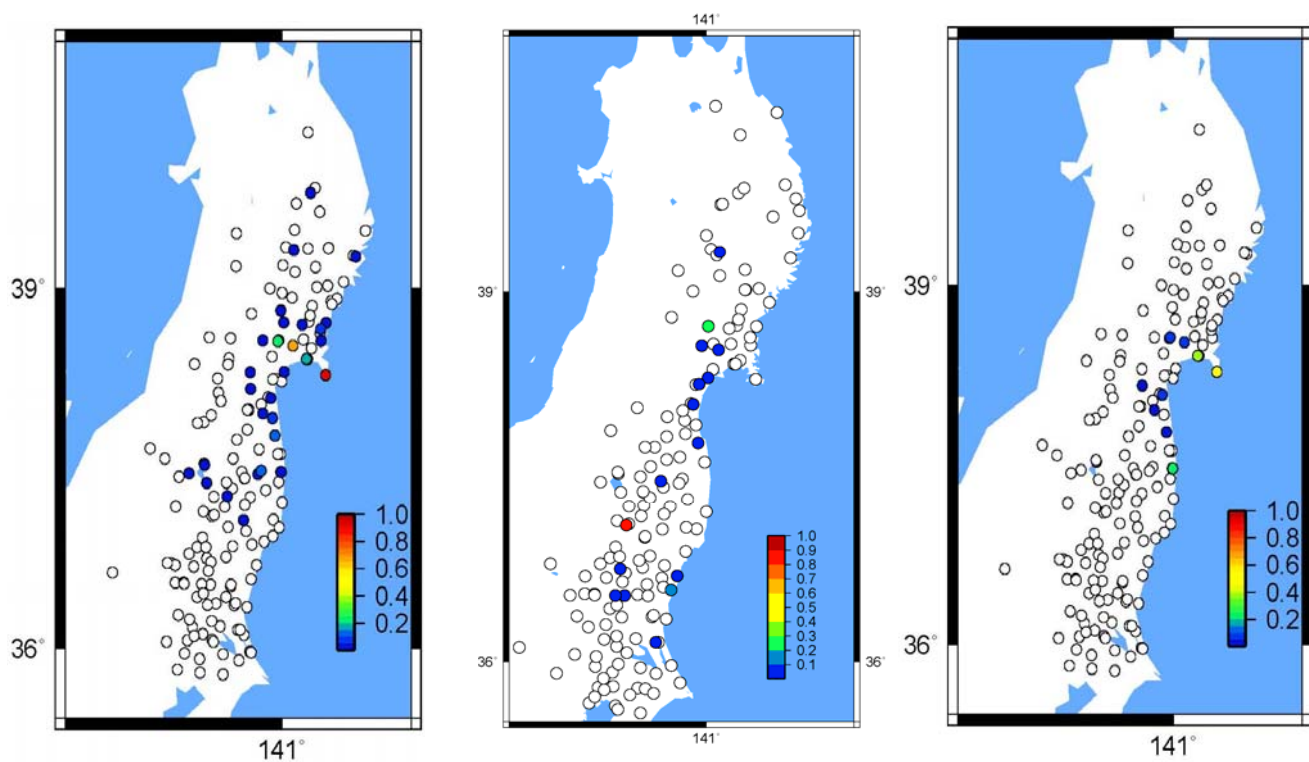


図 3-18 鉄筋コンクリート造 3 階建被害率 (新耐震) 鉄筋コンクリート造 6 階建被害率 (新耐震) 鉄筋コンクリート造 9 階建被害率 (新耐震)

3.6 本章のまとめ

本章では、まず 2011 年東北地方太平洋沖地震において観測された地震動の構造物破壊能を長戸・川瀬建物群モデルを用いた計算被害率を用いて把握した。その結果、高い被害率は地域的には宮城県、福島県及び茨城県の一部に生じ、主として海岸線沿いと、海岸線から 40km~60km 内陸側の細長い帯に集中していることが分かった。推定被害率が大きくなる地点が必ずしも震源から近いところではないこと、同じ観測点でも旧耐震と新耐震、構造種別により推定される被害は異なることがわかった。しかし、非常に大きな加速度を記録したにも関わらず、揺れによる大きな建物被害は少なかった。その原因について分析するため、高い震度が観測された地点の擬似速度応答スペクトルを計算し、過去の大被害もたらした兵庫県南部地震で観測された強震動の擬似速度応答スペクトルと比較したところ、大被害に直結する周期 1 秒前後のレベルが約半分であること、さらに過去の地震に用いられてきた最大加速度-等価卓越振動数ダイアグラムを用いて比較したところ、今回の東北地方太平洋沖地震での観測地震動は大破以上の被害が出る危険ゾーンに入らないことがわかった。すなわち、地震動の性質として中低層建物に大被害を与える「やや短周期域」のエネルギーがあまり強くなかったことが被害の少なかった原因と推察できることを指摘した。このことから、被害が少なかったことは、必ずしも東北地方の建物の耐震対策が充分に進んでいたこと、あるいは保有耐力を余分に持っていたためであったことを意味していない。現在も耐震性の低い建物や老朽化した建物が数多く存在しており、それらの建物の実際の耐震性能を把握し地震被害に備えることは地震安全対策上極めて重要である。またこのことは、近未来に発生するであろう想定地震における建築物被害を定量的に想定するためには、最大値指標によることなく、個々の地震動特性とそれを受ける個々の建物の応答特性を考慮した被害予測をすることが重要であることを示している。

さらに本章では、既往研究で提案されている 4 つの強震動生成領域からなる震源モデルと、我々が開発してきた長周期まで有効な統計的グリーン関数を用いて、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震を再現した。再現した強震動を実際の計測震度分布や経験的距離減衰式と比較し、その妥当性を検証した。そのあと再現強震動の構造物破壊能を長戸・川瀬建物群モデルを用いて計算被害率分布から求めた。その結果、観測強震動による推定被害率より若干少なめとなることがわかった。これは再現強震動の最大速度値が小さめであったことと関係している可能性が指摘された。また推定被害率が大きい解析点は宮城県の海岸沿いの観測点及び陸側の高い震度が観測された解析点に集中しており、この被害地域は観測強震動を用いた結果とほぼ同じ傾向となっていることがわかった。

第3章の参考文献

- [3-1] 気象庁：災害時地震・津波速報，平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震，2011.4.
- [3-2] 2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，日本建築学会，2011.7.
- [3-3] 長戸健一郎・川瀬博：建物被害データと再現強震動によるRC造構造物群の被害予測モデル，日本建築学会構造系論文集，544，31-37，2001.6.
- [3-4] 長戸健一郎，川瀬博：鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第559号，101-106，2002.9.
- [3-5] 長戸健一郎，川瀬博：強震動特性と構造物の被害，月刊地球／号外NO.37，203-211，2002.
- [3-6] 包那仁満都拉・川瀬博：強震ネットワークデータから構築した広周波数帯域統計的グリーン関数とその南海地震への応用，日本地震工学会，第7巻，第2号（特集号），80-95，2007.
- [3-7] 佐藤智美：経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデルプレート境界地震の短周期レベルに着目して－，日本建築学会構造系論文集，第675号，695-704，2012.5.
- [3-8] 境有紀：2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性－建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標－，日本建築学会構造系論文集，第683号，35-40，2013.1.
- [3-9] 佐藤俊明：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震，－地震の概要－，2011.4.
- [3-10] Aoi, S., T. Kunugi, and H. Fujiwara, STRONG-MOTION SEISMOGRAPH NETWORK OPERATED BY NIED: K-NET AND KiK-net, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 3 (Special Issue), 65-74, 2004.
- [3-11] 川瀬博，松島信一，宝音図：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2章(分担執筆)，日本建築学会，2011.7.
- [3-12] 宝音図，川瀬博，松島信一：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震における長戸・川瀬建物群モデルによる予測被害率，日本地震学会秋季大会予稿集，B21-12，2011.10.
- [3-13] Okada, Y, Kasahara, K, Hori, S, Obara, K, Sekiguchi, S., Fujiwara, H., and Yamamoto, A., Recent progress of seismic observation networks in Japan Hi-net, F-net, K-NET and KiK-net, Earth, Planets and Space, Volume 56, p. xv-xxviii, 2004
- [3-14] Irikura, K: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 151-156, 1986.
- [3-15] 宝音図，川瀬博，松島信一：2011年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能，東日本大震災2周年シンポジウム論文集，293-298，2013.3.
- [3-16] 司宏俊・翠川三朗：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，63-70，1999.9.
- [3-17] 境有紀：2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と被害調査速報，
<http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/113.htm>

第4章 西南日本における地震活動の特徴と想定震源特性

4.1 はじめに

4.2 日本の地震活動について

4.3 西南日本における地震活動の特徴

- 4.3.1 西南日本における太平洋側沖合などのプレート境界付近で発生する地震
- 4.3.2 西南日本におけるフィリピン海プレートの沈み込みによるプレート間地震
- 4.3.3 西南日本における沈み込むフィリピン海プレート内の地震
- 4.3.4 西南日本における陸域の浅い地震（深さ約 20km 以浅）
- 4.3.5 西南日本における日本海東縁部の地震

4.4 南海トラフ沿いの想定巨大地震の震源特性

第4章の参考文献

4.1 はじめに

地震災害における防災・減災の上では過去の地震被害の原因究明を地震災害調査によって明らかにすることが極めて重要となる。特に、将来発生するであろうこれらの想定地震による被害推定を行うときに、震源域において繰り返し発生している地震動の特性を把握することは、都市防災・減災計画や構造物の地震安全性のための最も基礎的かつ重要な資料となる。南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の震源域である西南日本地域で発生している地震として、太平洋側沖合の駿河トラフや南海トラフから陸側へ傾き下がるプレート境界付近で発生する海域の地震、陸域の浅いところ（深さ約 20 km 以浅）で発生する内陸地震、日本海東縁部（新潟県沖合付近）で発生する地震^[4-1]などがあげられる。西南日本における過去の地震記録および歴史地震資料から、駿河トラフや南海トラフ沿いの震源域では、100～150 年間隔で繰り返し発生しているマグニチュード 8 クラスの巨大な海溝型東南海・南海地震などがあり、その震源域に近い太平洋沿岸を中心に、地震の揺れや津波により広域かつ甚大な被害をもたらしてきた。明治以降では、昭和東南海地震 M7.9(1944 年)、昭和南海地震 M8.0(1946 年)が海域に発生し、地震動や津波などによる大きな被害を生じた。一方、陸側の地域では、市街地の直下で発生した福井地震 M7.1(1948 年)、平成 7 年兵庫県南部地震 M7.2(1995 年)や比較的規模の大きな浅い地震の濃尾地震 M8.0(1891 年)などが挙げられ、市街地は壊滅的な被害を受けた。明治以降の震災について死者数で比較すると、大正関東地震 M7.9(1923 年)、東北地方太平洋沖地震 M9.0(2011 年)、明治三陸地震 M8.2～8.5(1896 年)の次にこの地域に起こった濃尾地震、平成 7 年兵庫県南部地震、福井地震などが挙げられ、いずれも死者・行方不明者を含めて、5 千人以上の犠牲者を生じ、甚大な震害を出した地震である。

4.2 日本の地震活動について

日本列島とその周辺には、海側の太平洋プレート、フィリピン海プレート、そして陸側のプレートと最低3つのプレートがある^[4-1]。陸側のプレートの東日本側は北米プレートであるとも考えられている(図2-1)。太平洋プレートは、ほぼ東南東の方向から年間約8cmの速さで日本列島に近づき、日本海溝などから陸側のプレートの下に沈み込んでいる。フィリピン海プレートは、ほぼ南東の方向から年間3~7cm程度の速さで日本列島に近づき、南海トラフなどから陸側のプレートの下へ沈み込んでいる。このような沈み込むプレートと陸側のプレート・北米プレートとの境界は、いわば岩盤の大きな境界(弱面)であり、近づき合うプレートどうしの中で圧縮の力がかかり、ここで規模の大きな地震(断層運動)が発生することは容易に想像できる。なお、東北日本の日本海側沖合(日本海東縁部)に沿ってプレートの境界があるとする説(図4-1の破線)も出されており、近年ここでは大きな地震が連なるように発生している。このように、海溝などに沿って発生している地震は、沈み込むプレートに直接関係して発生する地震と考えられる。また、陸域の浅い場所で発生する地震は、沈み込むプレート境界から少し離れたところで発生しており、プレートの沈み込みに伴って周囲にかかる力によって発生すると考えられる。

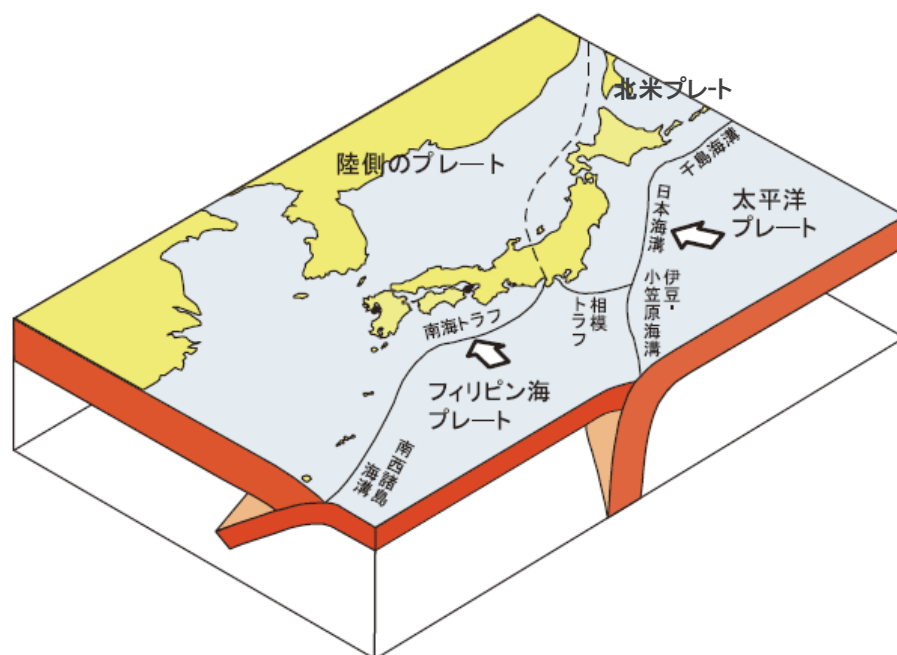


図 4-1 日本列島とその周辺のプレート (地震調査研究推進本部^[4-1]より抜粋)

日本列島には太平洋側から太平洋プレートやフィリピン海プレート（海側のプレート）が押し寄せ、列島の下に沈みこんでいるため、強い圧縮の力が働いている。これに伴い、様々なタイプの地震が起きている（図 4-2）。日本列島とその周辺で発生する規模の大きな地震について、起き方や場所によって、1) プレート境界付近で発生する起きる地震、例えば、太平洋プレートの沈み込みによるプレート間地震、フィリピン海プレートの沈み込みによるプレート間地震、プレート間で稀に発生する巨大地震、沈み込む海側のプレート内地震など、2) 陸域の浅い地震（陸側のプレート内地震）、3) 日本海東縁部の地震、4) その他の地震、例えば、火山活動に伴う中小規模の地震や群発地震、ダム誘発地震などがある。断層はそのずれの方向により（図 4-2、活断層の地震）、横ずれ断層と縦ずれ断層に分けられる。ずれ方によって横ずれ断層には、断層の向こう側が手前側に対し、右にずれたときは右横ずれ断層、左側にずれたときは左横ずれ断層と呼んでいる。また、縦ずれ断層には正断層と逆断層があり、断層面が傾斜しているとき、断層面の上方部分がすべり落ちる形を正断層、のし上がる形を逆断層と呼んでいる。地震の際には、断層のタイプはそこに働く力の状態と密接に関係する。正断層はプレートに水平に引っ張られる力が働く場、逆断層や横ずれ断層は水平に圧縮される力が働く場で起こる。水平に圧縮される力がかかっているところで横ずれと縦ずれの断層が組み合わさって現われることもある。

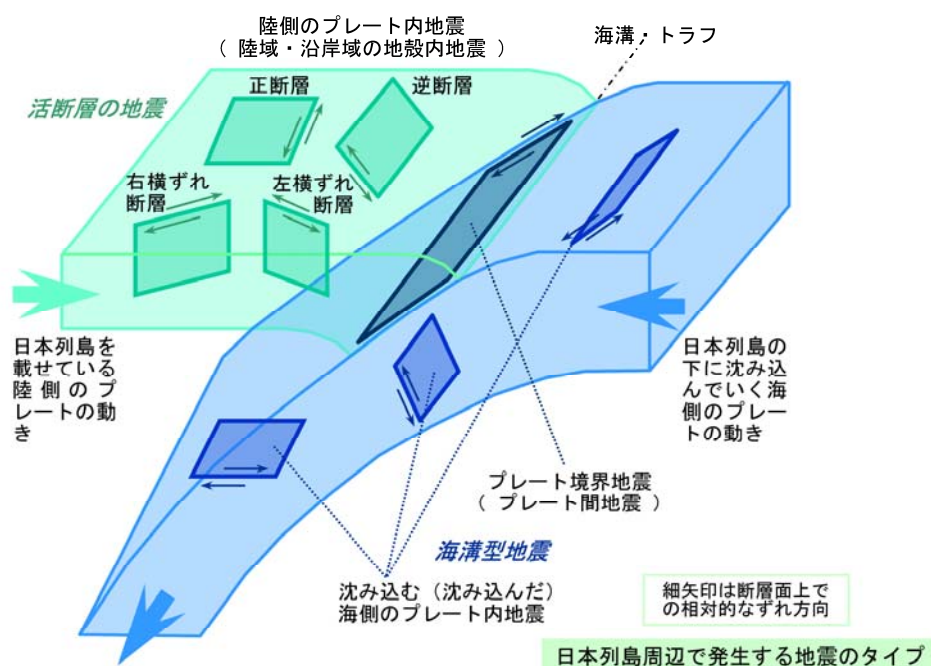


図 4-2 日本列島とその周辺で発生する地震のタイプ（地震調査研究推進本部^[4-1]より抜粋）

4.3 西南日本における地震活動の特徴

日本には、地質学において、地質構造をもとに日本列島を大きく2つに東北日本と西南日本に分けられる。日本列島は構造的に大きく本州中部を南北に走る断裂帯であるフォッサマグナ（フォッサ＝裂け目、マグナ＝大きい）の西縁の糸魚川－静岡構造線以東は新第三系の分布が広く、以西は先新第三系が広く分布する。このことから新第三紀以降の東西日本の境界は糸魚川－静岡構造線とされている（図 2-3）。しかし、糸魚川－静岡構造線より東はフォッサマグナという地溝になっているはずであるが、現在は火山噴出物などで埋まれ、その東縁（棚倉構造線）は不明瞭である。フォッサマグナを境に東北日本と西南日本と分けることもある。また、西南日本の古い骨組みを食いちがわせた中央構造線（大規模な断層）は関東から沖縄まで、南海トラフ（図 4-3、赤線_概ね位置）とほぼ平行し、続いていることが分かる^[4-2]。それを境に、西南日本を内帯と外帯に分けられる。西南日本には、中部地方、近畿地方、中国・四国地方、九州や沖縄地方が含まれる。

一方、西南日本には、フィリピン海プレートの沈み込みによるプレート間地震としては、太平洋側沖合にある駿河トラフや南海トラフ沿いで発生する巨大地震の東海・東南海、南海地震などがある。これらの被害地震は、フィリピン海プレートの沈み込みに伴って、陸側のプレートの端が引きずれこまれ、限界に達したときに陸側のプレートが跳ね上がり、概ね 100～150 年の間隔で発生する。今世紀前半での発生が懸念されている。さらに、その前後には内陸の地震活動が活発化すると想定される。本節では、主に本研究の想定震源域における中部地方、近畿地方や中国・四国地方において地震活動の特徴を述べる。



図 4-3 西南日本における主な構造線と南海トラフ（Google 地図^[4-2]に加筆）

4.3.1 西南日本における太平洋側沖合などのプレート境界付近で発生する地震

フィリピン海プレートは、駿河湾および中部地方の太平洋側沖合にある駿河トラフと南海トラフから、中部地方の下へ沈み込んでいる（図 4-4）。また、太平洋プレートは、関東地方東方沖合の日本海溝から、中部地方の下へ沈み込んでいる（図 4-5）。太平洋側沖合などのプレート境界付近で発生する地震は、フィリピン海プレートの沈み込みにより発生するプレート間地震とフィリピン海プレートの内部で発生する地震に分けられる。

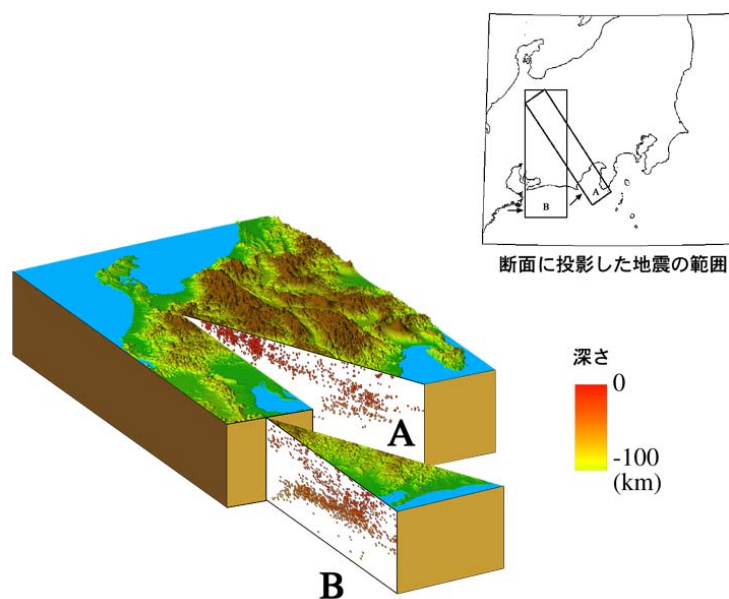


図 4-4 中部地方の震源位置とフィリピン海プレートの沈み込み^[4-1]

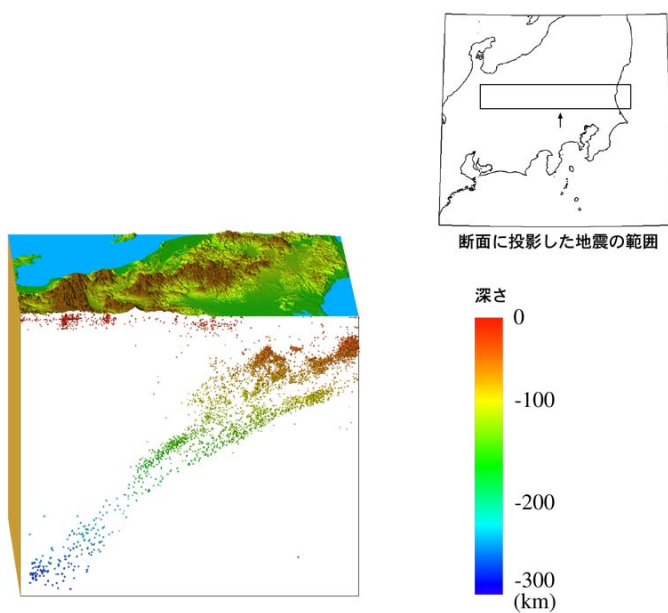


図 4-5 中部地方の震源位置と太平洋プレートの沈み込み^[4-1]

フィリピン海プレートは、中国・四国地方と近畿地方の太平洋側沖合にある南海トラフから、近畿地方、四国地方の下に沈み込んでいる（図 4-6, 図 4-7）。太平洋側沖合などのプレート境界付近で発生する地震は、沈み込むフィリピン海プレートと陸側のプレートがその境界でずれ動くことにより発生するプレート間地震と、沈み込むフィリピン海プレートの内部で発生する地震に分けられる。この他、中国・四国地方の深さ 200～400km という深いところで、日本海溝から日本列島の下に沈み込んでいる太平洋プレートに関する地震も発生する、中国・四国地方には沈み込むフィリピン海プレートの内部で発生するやや深い地震に分けられる。太平洋側沖合などのプレート境界付近で発生する地震は近畿地方以西に大きな被害を及ぼす可能性は低いと考えられる。

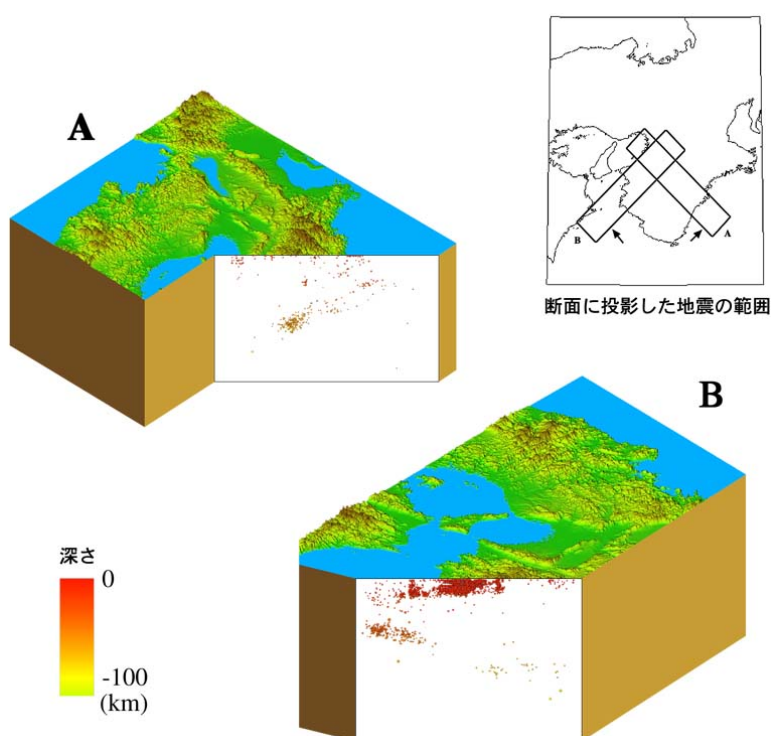


図 4-6 近畿地方の震源位置とフィリピン海プレートの沈み込み^[4-1]

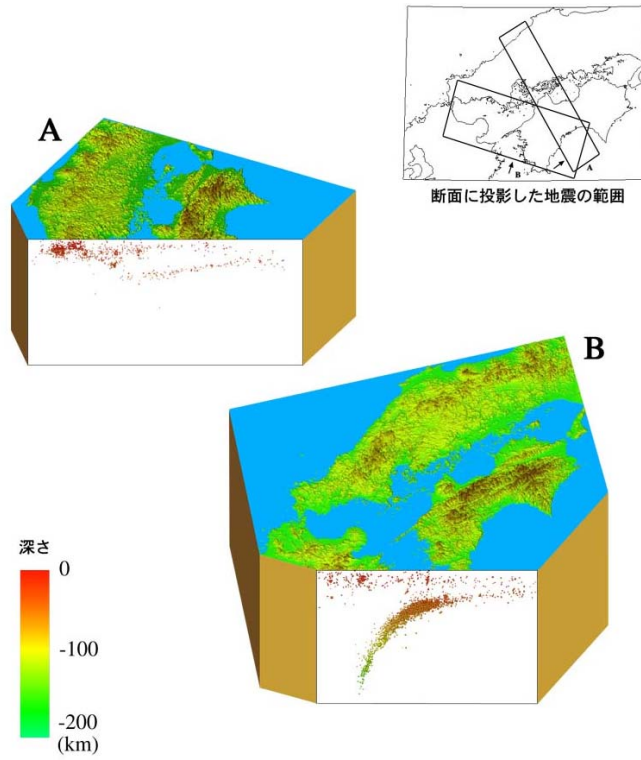


図 4-7 中国・四国地方の震源位置とフィリピン海プレートの沈み込み^[4-1]

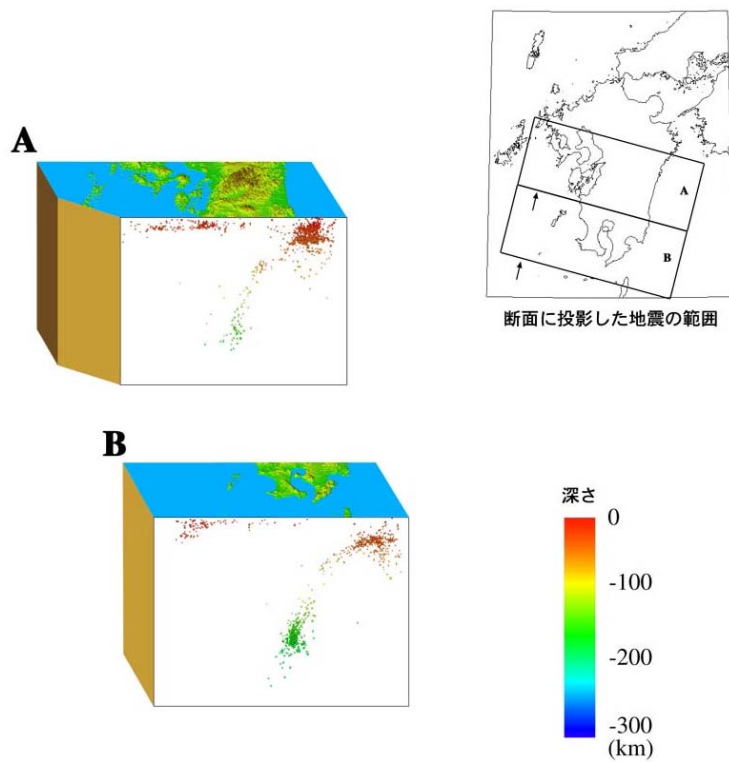


図 4-8 九州地方の震源位置とフィリピン海プレートの沈み込み^[4-1]

4.3.2 西南日本におけるフィリピン海プレートの沈み込みによるプレート間地震

フィリピン海プレートの沈み込みによるプレート間地震としては、駿河トラフや南海トラフ沿いの巨大地震がある。このタイプの地震は、中部地方を含む広範囲にわたる地震動による被害とともに、房総、伊豆半島から九州に至る太平洋沿岸に津波による被害をもたらす。特に、紀伊半島沖から東海地方の沖合を震源域とした場合には、中部地方に大きな被害をもたらす。また、1707 年の宝永地震（M8.4）^[4-1]のように駿河湾周辺から四国西部までの広い範囲を震源域とする巨大地震が発生することもあり、この場合には中部地方の広い範囲にわたって著しい被害が生じる。駿河トラフから南海トラフにかけては、過去にこのような地震が繰り返し起こっており、歴史の資料に数多くの地震の記録が残っている（図 4-9）^[4-1, 4-3]。東海沖から四国沖にかけての南海トラフ沿いで発生する巨大地震は、ほぼ 100～150 年間隔で繰り返し発生してきたことが分かっている。これらの巨大地震が発生する範囲はある程度決まっており、四国沖～紀伊半島沖（南海沖）だけを震源域とする地震を南海地震といい、それより東側（東海沖）だけを震源域とする地震を東海地震と言うことが多い。なお、その発生が懸念されている。いわゆる「東

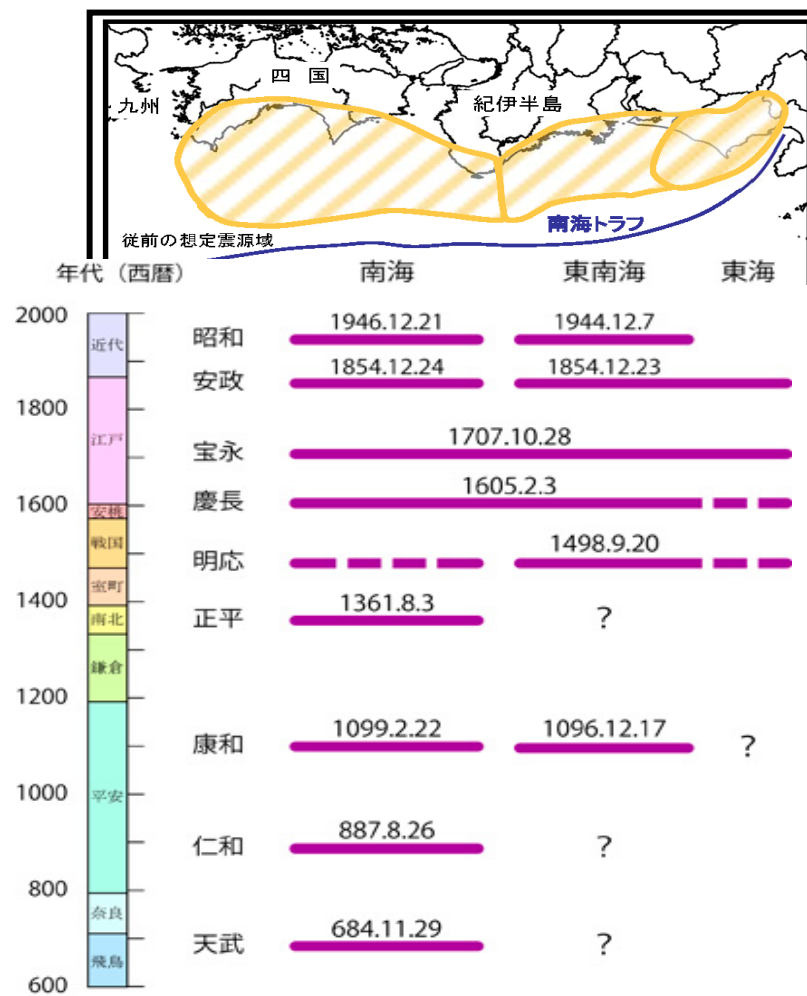


図 4-9 歴史記録に残された南海、東南海、東海地震の発生時期と領域
(岡村^[4-3], 2012 ; 地震調査委員会^[4-1], 2012 より)

海地震」は、駿河トラフ周辺を震源域とする地震であり、歴史上の東海地震と比べ震源域がかなり狭いものである。

これまで南海トラフ沿いでの巨大地震は、震源域を隣り合わせて続けてないしは同時に発生してきた。特に、続けて発生した場合には、東側（東海沖）でまず発生し、その後西側（南海沖）で発生したことが多い。例えば、1944 年の東南海地震（M7.9）と 2 年後の 1946 年の南海地震（M8.0）のように巨大地震が数年おいて続けて発生したり、1854 年 12 月 23 日の安政東海地震（M8.4）とその 32 時間後の 12 月 24 日の安政南海地震（M8.4）のように数時間のうちに立て続けに発生したりしたことがある。さらに、東海沖と南海沖ではほぼ同時に 2 つの地震が起こった、あるいは東海沖から南海沖に至る海域全体で起こったと考えられている 1605 年の慶長地震（M7.9）や 1707 年の宝永地震（M8.4）もある。これらの地震は、日本の他の地域の地震に比べ、発生間隔などがよく分かっている地震であるが、地震動や津波の大きさは毎回かなり異なっている。例えば、1605 年の慶長地震では、関東地方から九州地方に至る太平洋沿岸に津波が押し寄せたが、それに対応する地震動による被害の記録がほとんどない。このため、この地震が通常の地震より断層がゆっくりとずれる津波地震であったとする指摘もある^[4-1]。近畿地方、四国地方の地殻変動を見ると、室戸岬周辺が 1946 年の南海地震を挟む期間、紀伊半島南部が 1944 年の東南海地震及び 1946 年の南海地震をはさむ期間には、ともに北西－南東方向に伸びていたことが知らせている^[4-1]。また、平常時には沈降していた室戸岬、潮岬ではこれらの地震に伴い約 70～100cm 隆起するなどの上下変動があったことが分かっている^[4-1]。これらの現象は、この地震により、四国地方、紀伊半島が載っている陸側のプレートが、太平洋側（南東側）に大きくのし上がったことを示している。室戸岬や足摺岬周辺、和歌山県南部の海岸部には、少なくともここ 10 万年間以上、南海トラフ沿いで発生する巨大地震により土地が隆起してできた階段状の平坦な地形（海岸段丘）が分布している。特に室戸岬付近、串本町付近では、約 125,000 年前に海岸線だったところが、現在では標高約 60～200m の高さまで持ち上げられていることが知られている。なお、室戸岬の背後（北西側）にある高知市周辺では、1946 年の南海地震時に最大約 1 m 沈降し、海水の侵入等の被害が生じた。1946 年の南海地震以降の期間では、四国全域で北西-南東方向の縮みが観測されている。これは、フィリピン海プレートの沈み込みによる次の南海地震の発生に向けた歪の蓄積が始まっていることを示している。

4.3.3 西南日本における沈み込むフィリピン海プレート内の地震

中部地方の下に沈み込む太平洋プレートやフィリピン海プレートの内部においても地震が発生しているが、これらは深い地震であり、中部地方に大きな被害をもたらすことはないと考えられる。ただし、奈良県中部、深さ約 60km で発生した 1952 年の吉野地震（M6.8）は、沈み込むフィリピン海プレート内の地震であり、中部地方では愛知、岐阜、石川の各県で小被害が生じたことが知られている^[4-1]。

フィリピン海プレートは南海トラフから近畿地方の下へ沈み込んでいるが、沈み込んだばかりの南海トラフ付近の浅いところのプレート内で発生した被害地震は知られていない。その延長の陸域の 30km より深いところでは、比較的規模の大きな地震が発生している。被害地震としては、奈良県を中心に被害を及ぼした 1952 年の吉野地震（M6.8、深さ 60km）が知られている。このタイプの地震は震源がやや深いために、被害を受ける地域が広範囲に及ぶことがある。

沈み込むフィリピン海プレート内部の地震の深さは、四国中央部の太平洋岸付近で約 30km、その北側、

例えば中央構造線付近では約 40km に達する。それより北では、不明瞭になる。四国地方の下に沈み込むフィリピン海プレート内では、定常的に規模の小さな地震が発生しているが、大きな被害地震は知られていない。これに対して、瀬戸内海の西部から豊後水道付近で定常的に発生している地震は、九州の下で発生している深い地震（九州の下に沈み込んだフィリピン海プレート内の地震）の発生域につながるようにみえる。瀬戸内海の西部から豊後水道付近では、周辺の沿岸地域に被害をもたらした地震がいくつも知られている。歴史の資料によれば M7 クラスの被害地震は、1649 年（M7.0）、1686 年（M7~7.4）、1854 年（M7.3~7.5）などである。明治以降には、1905 年に芸予地震（M7 1/4）が発生している。これらの地震は沈み込んだプレート内のやや深い地震とも考えられるが特定はできない。なお、1968 年の豊後水道での地震（M6.6）や 1979 年の瀬戸内海西部での地震（M6.1）はやや深く、沈み込んだプレート内の地震である。さらに、九州地方の下に深く沈み込んだプレート内で発生する大地震によって被害を受けることもある。

4.3.4 西南日本における陸域の浅い地震（深さ約 20km 以浅）

日本列島の陸域では、阪神・淡路大震災を引き起こした 1995 年の兵庫県南部地震（M7.3）のような大きな地震が発生することがある。日本列島の地下には、一般に東西方向ないし北西-南東方向の強い圧縮の力がかかっており、そのため、このような地震が発生する。これまでの調査研究により、陸域では、地震を発生させるような硬さを持つ岩盤は、せいぜい地下 15~20km 程度までであり、それより深いところでは、温度が高いため、岩盤に力がかかっても急激な破壊は起こさず流動的に変形してしまうと考えられている。したがって、陸域で発生する規模の大きな地震は、その震源が 20km 程度より浅く、規模も M7 程度のものが多いが、1891 年の濃尾地震（M8.0）のように M8 程度の例もある。このように、このタイプの地震は震源が浅いため、M7.0 程度以上の大地震が発生した場合、断層運動が地表面まで達して、地表にずれが生じることが多い。地形や地質の調査から、地表をずらした断層では、少なくとも過去数十万年にわたって、そのようなずれが累積してきたことが分かっている。これは、ほぼ同一の既存の弱面（断層面）で、ずれを繰り返してきたこと、すなわち、そこで何度も大地震が発生してきたことを意味している。また、このことは、日本列島の地下には、少なくとも最近数十万年の間、同じような力がかかってきたことを示している。したがって、地下に同様の力がかかっている限り、このような断層では、今後も大地震が繰り返し発生すると考えられる。過去に活動を繰り返し、今後もその可能性がある断層を活断層と呼ぶ。活断層は、過去の地震に伴うずれの累積により、もともと一続きだった地形が不連続になるなどの独特な地形を形成する。したがって、このような地形を手がかりにして、活断層を見出したり、活動度を推定したりすることができる。日本列島とその周辺における主な活断層の分布を見ると、山地と低地の境目に活断層が分布するなど、地形と活断層の分布には密接な関係のあることが分かる。活断層を詳しく調査すると、それぞれの活断層によって、ずれの累積する割合が大きく異なっていることが分かる。すなわち、活断層の活動の程度は、活断層によって大きく異なる。このような活動の程度を活動度と呼び、1000 年あたりの平均的なずれの量（平均変位速度とも呼ばれる）に基いて、それが大きい順に、A、B、C 級の 3 つのクラスに区分されている^[4-1]。活動度が最も高い A 級の場合、1000 年あたりの平均的なずれの量は、1~10m とされる。活動度は、個々の活断層での地震の発生間隔あるいは地域的な地震活動の特徴を考える上で、重要な指標となる。例えば、活動度 A 級の活断層が多数分布

している地域では、そうでない地域に比べて、規模の大きな地震が発生する頻度は高いといえる。日本列島では、活断層の活動の繰り返しなどによって平野や盆地が形成され、そこに市街地が発達することが多い。したがって、市街地の直下やごく近くで大地震が発生することもある。また、平野や盆地などでは、場所により河川等で運ばれてきた堆積物が非常に速く積もることがあり、このようなところでは、地形だけを見ても活断層の存在が分からないこともある。また、2007 年の能登半島地震 (M6.9) や 2007 年の新潟県中越沖地震 (M6.8) は、日本海のお底に分布する活断層で発生した地震である。海岸に近い海底の活断層で地震が発生した場合は、強い地震動とともに津波が直後に来ることになる。なお、陸域では、より深いところ (50~200km 程度) でも地震が発生しているが、これは沈み込んだ太平洋プレートやフィリピン海プレートの内部で発生する地震である。

4.3.5 西南日本における日本海東縁部の地震

新潟県の沖合から北の日本海東縁部では、最近規模の大きな地震が立て続けに発生している。これらの地震では地震動のほか、津波による被害が目立つ。震源域が陸域に近いため、非常に短時間で津波が沿岸に達する。中部地方では、1964 年の新潟地震 (M7.5) がこのタイプの地震であるとされている。また、2007 年新潟県中越沖地震では、津波の被害はなかったものの、震源近傍で非常に大きな地震動は観測され、原子力発電所にとって初めての地震被害が発生した。最近、日本海東縁部にプレート境界があるとする説も出されている (図 4-2, 破線)。この説によると、このプレート境界の南への延長は、新潟県の中~南部から富山湾付近にかけてのどこかから南へ下り、糸魚川-静岡構造線付近に沿ってほぼ南北に本州を横断し、駿河トラフや相模トラフにつながるものと考えられている。また、このようなプレート境界はある程度の幅をもつとする考え方もある。なお、糸魚川の沖合付近から富山湾付近にかけては、ここで規模の大きな地震が発生したという明確な記録はない。現在のところ、日本海東縁部がプレート境界でなくても現象が説明できるという説もあり、結論を出すには到っていない。

その他も、プレート境界ではプレートの沈み込むに伴い、プレート境界の断面層が急速にずれることで地震が起こるというが、最近の GPS やひずみ計などの地殻変動の観測からは、プレート境界の断面層が急速にではなく、数日~数年をかけてゆっくりとずれる (すべる) 現象も観測された。プレート境界を境に岩盤同士がずれるという点では、基本的な地震が起こるのと同じですが、地震波を出さずゆっくり動くことから、「ゆっくりすべり (スロースリップ)」と呼ばれている。これは、豊後水道や房総沖、最近では東海地方などで見られ、通常のプレート間地震の発生する場所よりも深い場所で発生していることが観測されている。この現象は、現在までのところ、直ちに被害を伴う地震とは結びついていないが、規模の大きい海溝型地震の発生が考えられる地域に隣接している場合もあり、ゆっくりすべりが海溝型地震の発生に結びつくという考えもある。

火山の山体の周辺では岩盤の浅い部分に局所的に力が働いており、火山活動に伴って中小規模の地震が発生することが多い。火山の周辺などでは、群発地震活動が見られることがある。例えば、伊豆半島東方沖の群発地震活動は、火山活動と関連して発生していると考えられる。

4.4 南海トラフ沿いの想定巨大地震の震源特性

南海トラフ沿いのプレート境界地震とは、駿河トラフや南海トラフ沿いで発生する巨大地震がある。この地震は、広範囲にわたる地震動の被害とともに、関東地方から九州・沖縄地方に至る太平洋沿岸に津波による被害をもたらす。また、場合によっては、1707 年の宝永地震 (M8.4-8.7) ^[4-1] のように駿河湾西部から四国西部までの広い範囲を震源域として、2011 年東北地方太平洋沖地震が発生するまでは、知られている限りにおいて日本最大の地震であったことは報告されてきた。このような地震は、過去に繰り返して発生しており、歴史の資料にも数多くの記録が残っている (図 4-9) ^[4-1]。記録をさかのぼると、古くは 684 年に、各地の地震動による被害とともに土佐で津波による多数の船の沈没と地震に伴う地殻変動による田畑の水没があったことが記録されている。その後も、887 年、1096 年及び 1099 年、1361 年、1498 年、1605 年、1707 年、1854 年、1944 年及び 1946 年と、地震繰り返し周期は 1361 年以降の地震では約 100 年であるが、それ以前の地震では約 200 年となっており、これは実際に繰り返し周期が変わった可能性もあるが、むしろ史料の不足により、地震を見落としている可能性があることも考えられる。それらは大きく三つのセグメントに分かれ、駿河湾から浜名湖にかけての領域で発生する地震を「東海地震」、愛知県沖の遠州灘から紀伊半島の南東側の沖合にかけての領域で発生する地震を「東南海地震」、紀伊半島の南西側の沖合から四国の沖合 (あるいは九州の日向灘) にかけての領域で発生する地震を「南海地震」と言うことが多い。ただし、東海地震とは、知られている限りは単独で発生したことがなく、発生する場合は東南海地震といっしょに発生してきた。このことから東海地震と東南海地震を区別せずに同じセグメントとしたほうがよいという考え方もある。いずれの地震も、単独で発生するとマグニチュード 8 クラスになると想定されている。これらの地震は、同時に発生したり、やや時間差をあけて発生したりと、さまざまなパターンが観られる。例えば、1944 年の東南海地震 (M7.9) と 2 年後の 1946 年の南海地震 (M8.0) のように巨大地震が数ヶ月から数年おいて続けて発生したり、1854 年 12 月 23 日の安政東海地震 (M8.4) とその 32 時間後の 12 月 24 日の安政南海地震 (M8.4) のように短時間のうちに立て続けに発生したりしたことがある。さらに、東海沖と南海沖でほぼ同時に 2 つの地震が起こった、あるいは東海沖から南海沖に至る海域全体で起こったと考えられている 1605 年の慶長地震 (M7.9) や 1707 年の宝永地震もある。

南海トラフ沿いの巨大地震は、ほぼ 100~150 年間隔で繰り返して発生し、日本の他の地域の地震に比べ、発生間隔などがよくわかっている地震であるが、地震動や津波の大きさは毎回かなり異なっている。例えば、1605 年の慶長地震では、関東地方から九州地方に至る太平洋沿岸に津波が押し寄せたが、それに対応する地震動による被害の記録がほとんどない。このため、この地震が通常地震より断層がゆっくりとずれる津波地震であったとする指摘もある。なお、前回の南海トラフでの地震の発生は、1944 年 (昭和東南海地震) と 1946 年 (昭和南海地震) である (ただし東海地震の領域では未破壊)。これらの地震からすでに 70 年近くが経過しており、南海トラフでの地震が差し迫ってきているということになる。先ほどあげた 100~150 年という発生間隔は、知られている範囲での過去の地震を参考にした、あくまでも「目安」であり、100 年よりも短い間隔で地震が発生した例もある。例えば、最新の南海トラフでの 1944 年昭和東南海地震の発生は、前回の南海地震である 1854 年安政南海地震からおよそ 90 年の間隔で発生した。さらに東南海・南海地震の今後 30 年以内の発生確率は 60%~70%程度^[4-4]と言われており、21 世紀の前半までには確実に発生が懸念されている。

政府の中央防災会議に設置された専門調査会^[4-5]は平成 15 年 4 月に「東海地震対策大綱」を、さらに同年 12 月には東南海地震、南海地震に対する防災対策推進地域を設定し、想定震源モデルと震源域の検討、地下構造モデルの検討・作成、強震動波形計算による強震動分布等の検討を行い、このような巨大地震が発生した時の強震動予測、被害想定が試みられ、過去の被害記録が残されている巨大地震の地震動再現と被害との比較により、その妥当性を評価している。専門調査会の報告によれば、これらのプレート境界の巨大地震では、阪神・淡路大震災を上回る強烈な地震動が広域にわたって発生し、住宅、公共建物、道路、鉄道施設、各種ライフラインシステム、臨海コンビナート施設等に甚大な被害が発生すること、および津波による広範な沿岸地域に被害が拡大することが予想されている。東海・東南海、南海地震のようにマグニチュードが 8 を越えるような巨大な地震の場合、断層面での破壊は一様ではなく、アスペリティと呼ばれるすべりの大きい場所が存在する不均質な破壊過程を示すことが過去の起こった大きい地震により示されている。これを踏まえ、震源モデルで設定される断層パラメーターとしては、断層の長さ・幅・面積・位置や地震モーメントなどの巨視的断層パラメーターだけでなく、不均質なすべり分布を評価するアスペリティなどの特性を示した微視的断層パラメータが設定されており、この不均質の分布も震源域における要素断層分布として設定されている。図 4-10 には、南海トラフ沿いに発生する海溝型巨大地震について、それぞれ東海地震・東南海地震、南海地震の想定震源域と震源断層の内部にアスペリティ（緑色の□で示すところ）が配置していることを示している^[4-5]。震源域は極めて広域にわたっているので、連動して発生した場合は、地震動の強い揺れの継続時間が長くなり、強い揺れによる地盤の液体化現象による大規模な被害が発生する。また、巨大な津波が起こることも考えられる。これらの地震ごとの震源断層の内部に、少なくとも三つのアスペリティが配置されていることがわかる。また、その想定地震度の分布を示している。

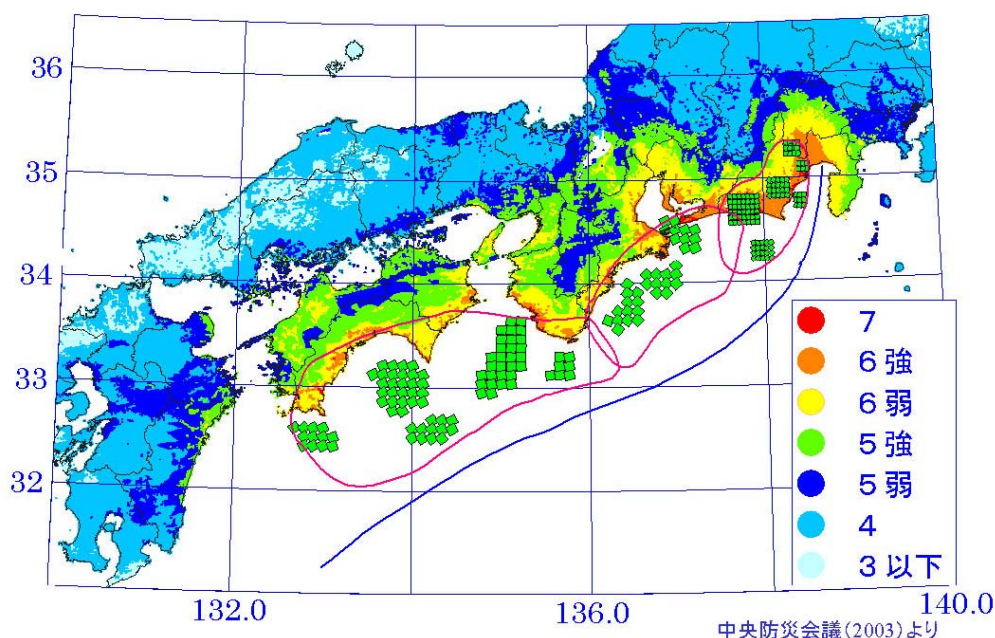


図 4-10 東海地震、東南海地震、南海地震の想定震源域およびアスペリティモデル
(中央防災会議, 2003 年より) ^[4-5]

政府は地震調査研究推進本部^[4-6]には、「地震調査研究の推進について-地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策-」（平成 11 年 4 月）を決定し、この中において、「全国を概観した地震動予測地図」の作成を当面推進すべき地震調査研究の主要な課題とし、また「陸域の浅い地震、あるいは、海溝型地震の発生可能性の長期的な確率評価を行う。」とした。海域に発生するプレート境界の巨大地震（海溝型地震）として、南海トラフに発生する海溝型巨大地震である南海、東南海地震について、長期的な観点で地震発生の可能性、震源域の形態等について、現在までの研究成果及び関連資料を用いて評価・公表した（平成 13 年 9 月）。南海トラフで起こった過去の巨大地震を概観すると、その揺れの強さや震源域の大きさなどに明白な違いがあるが、次の地震がどのタイプのものか現時点での予測は困難なようである。強震動評価部会では被害の大きかった安政の南海地震と同程度の地震規模を想定し、震度分布などを公開した。震源域については、地震調査委員会での検討結果等を踏まえ、強震動計算結果と過去の地震に被害実態とを比較検討し、必要な修正を行った上で設定している。図 4-11 には、地震調査研究推進本部^[4-1]による東南海地震・南海地震の想定震源域と震源断層の内部にアスペリティが配置していることを示している。各セグメントにおけるアスペリティのサイズと実効応力は 南海トラフ沿いに起こった過去の地震に対応させて設定している。セグメントごとに三つのアスペリティが配置していることがわかる。

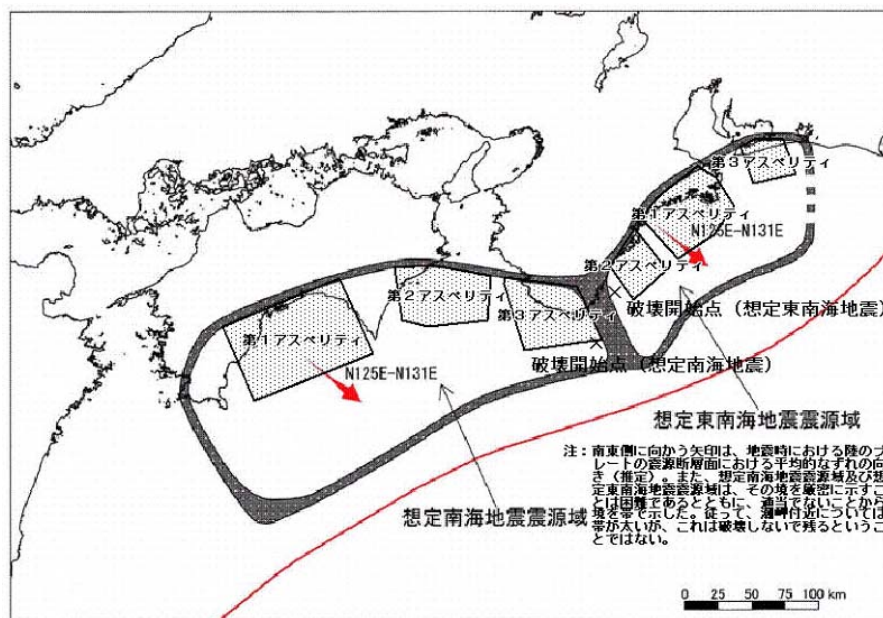


図 4-11 地震調査研究推進本部による東南海地震・南海地震のアスペリティモデル(推本, 2003) ^[4-1]

中央防災会議の強震動予測は震度分布を目的としているため周期 1 秒以下の短周期地震動の推定に有効な統計的グリーン関数法を用いているが、この方法は一般に実体波（S 波）部分のみ評価しかできないので表面波の影響の大きいより長周期の地震動の推定には適していない。長周期地震動を含む地震動の評価を行うには適切な小地震の記録をグリーン関数として用いる経験的グリーン関数法、あるいは長周期地震動を有限差分法などで数値的に評価するハイブリッド法などを用いる必要がある。

経験的グリーン関数法は地下構造の情報を必要としないという大きな利点はあるが、想定震源域付近に発生した小地震の記録が必要なためきわめて限定的な地点にしか適用できない。釜江・他(2003)は大阪の上町台地にある管区気象台の速度型強震計で得られた記録を用いて経験的グリーン関数法による東南海、南海地震、さらに東南海と南海地震の同時発生に対する地震動のシミュレーションを行っている^[4-7, 4-8]。震源モデルは図 4-12 に示されるように地震調査委員会によるモデルを採用している。東から想定東南海地震、東南海地震、南海地震の 3 つのセグメントを考え、各セグメントにおけるアスペリティのサイズと実効応力は 1854 年安政東海、南海地震に対応させて設定している。次の南海トラフ地震はこれらのセグメントの種々の組み合わせにより異なった地震動が生成されることになる。

その他にも地方自治体、関係研究機関、大学の研究者なども、東海・東南海、南海地震に関する調査・研究が進められており、政府の中央防災会議に設置された専門委員会、震調査研究推進本部の地震調査委員会で想定されている震源に関する条件から震源モデルを設置し、強震動の予測を行っている。

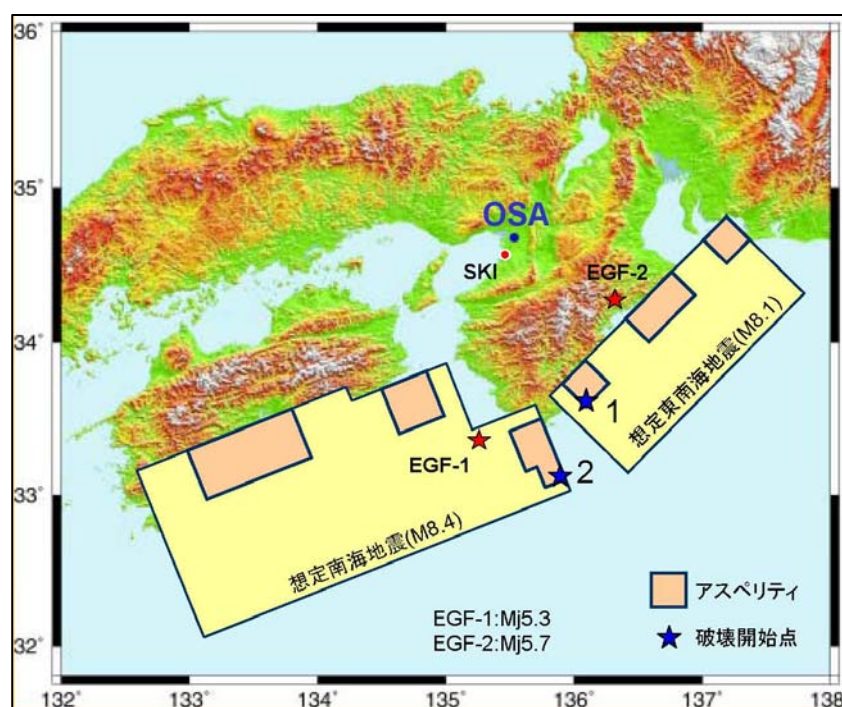


図 4-12 地震調査研究推進本部による東南海地震・南海地震のアスペリティモデル（釜江，2003）^[4-7]

第4章の参考文献

- [4-1] 地震調査研究推進本部，日本の地震活動 - 被害地震から見た地域別の特徴 - ，
http://www.jishin.go.jp/main/p_koho05.htm
- [4-2] Google：ホームページ，<https://maps.google.co.jp/>
- [4-3] 岡村土研：ホームページ，過去の南海地震，
<http://sc1.cc.kochi-u.ac.jp/~mako-ok/nankai/05historical.html>
- [4-4] 中央防災会議「南海トラフの巨大地震モデル検討会」（2011）：南海トラフの巨大地震モデル検討会、中間とりまとめ.
- [4-5] 中央防災会議「東南海、南海地震に関する専門調査会」（2003）：第10回東南海、南海地震に関する専門調査会資料.
- [4-6] 地震調査研究推進本部、地震調査委員会（2001）：南海トラフ地震の長期評価について.
- [4-7] 釜江克宏：経験的グリーン関数法を用いた想定東南海，南海海時の強震動予測，平成16年度地震動部会報告書，土木学会・日本建築学会，Vol.4.1，81-86，2005. 3.
- [4-8] 川辺秀憲，釜江克宏，入倉孝次郎：理論的，半経験的地震動評価手法を用いた想定南海地震・想定東南海地震時の強震動予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，161-162，2003.9.

第 5 章 西南日本海溝型地震の統計的グリーン関数による広帯域強震動予測

5.1 はじめに

5.2 包・川瀬による統計的グリーン関数

5.3 震源断層のモデル化及び解析点

5.4 想定波形の合成方法

5.5 波形合成とその妥当性の検討

5.6 第 5 章のまとめ

第 5 章の参考文献

5.1 はじめに

平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分、太平洋三陸沖から茨城沖に至る広い領域を震源とした超巨大地震の東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震により、1 万 8 千人を超える死者・行方不明者が生じ、東日本の太平洋沿岸を中心に壊滅的な被害をもたらした。今回のよう超巨大な地震は稀にしか生じないと考えられるが、一般的な M8 クラスの海溝型巨大地震は発生する確率が相対的に高く、影響する地域が広域にわたり、強震動による建造物の倒壊・地滑り・液状化・地盤沈下・津波などの直接的な被害のほか、火災、産業施設被害、交通機関の乱れなど二次被害を生じ、結果として、経済的にも全国的な影響をもたらすという特徴がある。その震源域は日本列島を囲むように分布しており、日本全域において、地域ごとにそれぞれの状況に見合った地震防災対策を行うことが急務とされている。東南海・南海地震の今後 30 年以内の発生確率は 50%~60%程度^[5-1]と言われており、発生すれば東海地方から九州地方に至る震源域に近い太平洋沿岸を中心に、地震の揺れや津波により広域かつ甚大な被害を与えるもの危惧されている。一方、将来発生するであろうこれらの想定地震における建築物被害を定量的に想定するためには、その地震動特性と建物の応答特性を考慮した被害予測をすべきであることは言うまでもない。国や地方自治体の努力にもかかわらず依然として現在も耐震性の低い建物や老朽化した建物が数多く存在しており、それらの建物の耐震性能を把握し被害を予測することは地震安全対策上極めて重要である。また、兵庫県南部地震の発生後の研究により内陸地震についてはかなりの精度で被害予測が可能なレベルになってきているものの（松島・川瀬^[5-2]、伊藤・川瀬^[5-3]）、海溝型地震の強震動を予測する上ではやや長周期域成分を多く含む強震動を的確に再現できる震源過程をどう表現するか等いろいろな問題が残されている。また構造物の定量的被害予測モデルを用いた被害総量の評価およびそれに基づいた被害軽減対策という、極めて重要な要素技術において未だ定量的に評価されているとは言い難い状態にある。

本章では、最新の強震動評価手法に基づき、発生が最も懸念されており連動破壊する可能性もある南海トラフ沿いの海溝型巨大地震、東海・東南海地震と南海地震の単独および連動発生時の西南日本における広帯域強震動を包・川瀬^[5-4]らが作成した長周期（10 秒）まで有効な統計的グリーン関数により定量的に予測する。そして、想定した予測強震動を過去の震度分布や経験的予測と比較し、その妥当性を検討した。

5.2 包・川瀬による統計的グリーン関数法

人間の生活を行っている場所における建築構造物や土木構造物の耐震安全性を評価するときに建てられている構造物の震動特性だけではなく、その場所の周辺にどのような地震が起こり(震源特性)、生じた波動がどのように伝播するか(伝播経路特性)、地盤構造によって地震波動がどのような影響を受けたか(サイト特性)など、すなわち、起こりえる強震動を予測することは非常に重要である。図 5-1 に地震と地震動の概念図を示す。地震動の予測を行う場合、これら 3 つの特性を精度良く評価する必要があるが、評価方法には大きく分けて「理論的方法」、「経験的方法」、「半経験的方法」の 3 つがある。理論的方法はこれら 3 つの特性を全て実体に則した物理モデルで表現し、理論的に地震動を計算する方法で、震源特性は「震源モデル」により、伝播特性と地盤特性は解析的、あるいは数値的に求めた「グリーン関数」により表現される。ここで、グリーン関数とは、断層のある点において微小な力を瞬時に作用させたときの、地震動を求めたい地点における揺れのことである。一方、半経験的方法は、理論的方法で必要となるグリーン関数を小地震による記録で代用する方法で、震源断層の面的効果を考慮する事ができ、精度が高い手法である。経験的方法は多数の地震記録を統計処理して、マグニチュードや震源距離などをパラメーターとする簡易な式(回帰式)を用いて、3 つの特性を表現する方法であり、地震動特性の評価精度は相対的に低くなる反面、対象地点で得られた情報の質・量によらず比較的安定的に地震動評価が可能な方法である。よって、構造物の設計用地震動策定や広域防災用の地震動評価等の目的で用いる上では、実用性が高いものと思われる。その実用性が高いことから半経験的方法の一つである統計的グリーン関数法を用いる研究が多数報告されている。釜江・他^[5-5]は、震源のスペクトルモデルや地震波の伝播過程を考慮した統計的シミュレーションにより、Boore^[5-6]の手法を用いて小地震の地震動波形を求めた上で、M7 級の地震による震源域での地震動を推定した。震源スペクトルの地域的なスケールリング則、地域的な Q_s 値、最大振幅や継続時間の経験的なスケールリング則が考慮されている。また、より地域性を反映した一連の研究例として、佐藤・他^[5-7]は、統計的にモデル化されたスペクトルと経時特性を用いて工学基盤でのグリーン関数を作成し、これを Dan. et al.^[5-8]の手法に従って重ね合わせることで、1978 年宮城県沖地震(Mj7.4)による仙台での地震動を推定した。さらに表層地盤の非線形性を考慮して地表地震動を評価し、観測記録・建物被害分布・墓石転倒率との対応を検証している。

包・川瀬^[5-4]は広帯域の地震被害予測を行う目的で、今までの周期 2~3 秒までの短周期的な統計的グリーン関数法から、巨大地震で重要となる周期 10 秒まで有効な統計的グリーン関数法の作成手法を構築している。彼らは川瀬・松尾^[5-9]の方法を参考にして、経験的方法を用いて日本全国の地域を対象として、1996 年 8 月から 2005 年 3 月にかけて、マグニチュード $M \geq 5.5$ 、震源深さ $\leq 60\text{km}$ 、最大加速度 $\leq 200\text{gal}$ 、最大震源距離 $\leq 400\text{km}$ の条件を満たす 110 個(そのうち、内陸地震が 25 個、海溝型地震でプレート内地震が 34 個、プレート間地震が 51 個である。その分類基準としては内陸地震では震源深さが 25km 以浅で震源が内陸部であること、プレート間地震は震源深さが 25km 以深であることと、1997 年以前は Harvard^[5-10]、それ以降は Freesia^[5-11]の発震機構解などから低角逆断層であることとそのすべり方向がプレートのもぐりこみ方向と一致していること、プレート内地震は震源深さが 25km 以深であることと発震機構解が低角逆断層でないこと、で判断している。)の地震による 1,684 個の観測点において観測された K-NET、KiK-net、JMA 強震観測データに基づき、内陸地震と海溝型地震に対する震源特性、伝播特性、サイト特性の分離を行い、長周期(10 秒)まで有効な統計的グリーン関数を作成した。推定された震源特性、伝播

特性、サイト特性を用い、日本全国における広帯域の強震動評価を行うことで、地震タイプ、地域特性を考慮した、精度の高い設計用入力地震動の作成が可能となっている。

図 5-2 では対象とした内陸地震、プレート間地震、プレート内地震の分布位置及び川瀬・松尾^[5-9]の研究に参考に、地域特性を考慮して全日本の火山や中央構造線などで全日本を 6 地域に分割した地域区と観測点位置を示す。経時特性のモデル化も含めグリーン関数の詳細は包・川瀬^[5-4]を参照されたい。

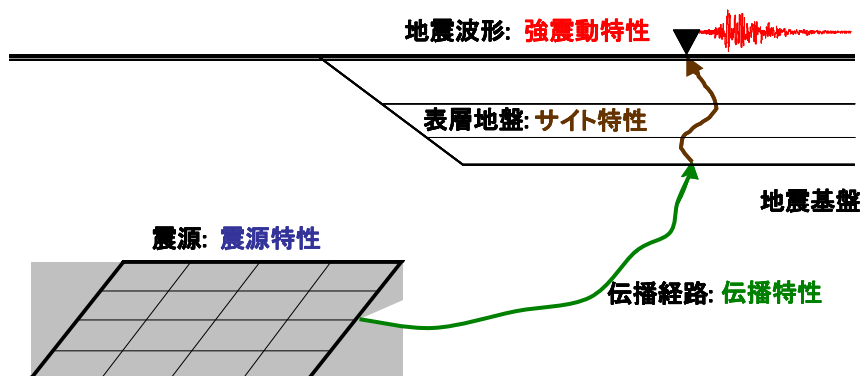


図 5-1 地震動の概念図

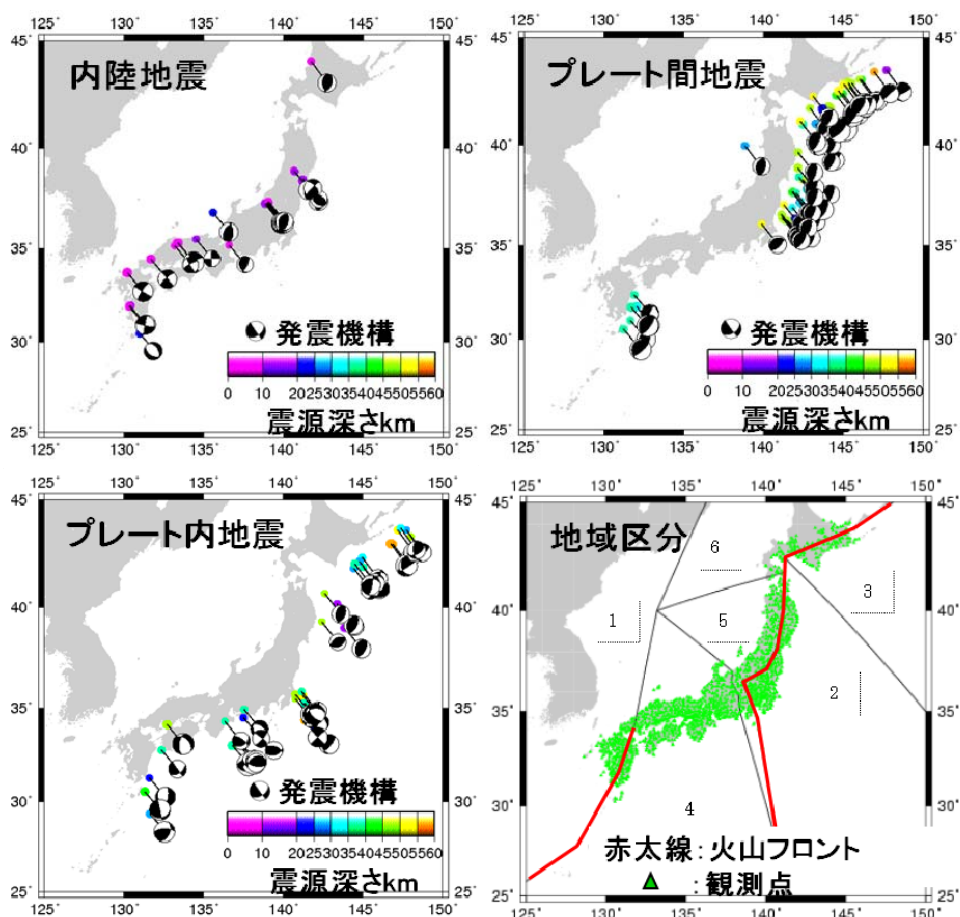


図 5-2 内陸地震、プレート間地震、プレート内地震の分布位置及び観測点位置と地域区分^[5-4]

5.3 震源断層のモデル化及び解析点

想定東南海地震の震源モデルとしては、地震調査研究推進本部が公開している巨視的および微視的震源特性の標準的設定手法を用いて、試算用に提案された震源モデルに準拠して、また釜江^[5-5]が構築したものも参考して、三つの大きなアスペリティと背景領域からなる不均質震源モデルを設定した。ここで用いている不均質震源モデルは、震源断層の中で比較的に大きくすべるアスペリティの中でもさらに不均質にすべると考慮して、アスペリティの22%の部分が平均すべり量の1.5倍大きくすべり（■印が付いている部分）、残りの78%の部分は平均すべり量より小さくすべると仮定したものである^[5-4]（この際地震モーメントは保存）。解析する地点は想定東南海地震のアスペリティと背景領域の中心点から400km 以内のK-NET、KiK-net、JMA 観測点であり、近畿・中部地域を中心とした領域を対象とした。図5-3 に想定東南海地震の震源断層でのアスペリティ位置、アスペリティ中心点（赤色マーク）、背景領域中心点（黒色マーク）と破壊開始点（★）をそれぞれ示す。また、解析対象点を◎で示す。表5-1に想定東南海地震の断層パラメータを示す。一方、統計的グリーン関数は、包・川瀬^[5-4]が作成した長周期まで有効なもの（スペクトルは震源特性・伝播特性・サイト特性に分離したもの、経時特性は $M \cdot \Delta$ 回帰したもの）を用いた。これらを用いて、Irikura^[5-12]の波形合成法により想定東南海地震の広帯域の強震動予測を行った。解析する地点は想定東南海地震のアスペリティと背景領域の中心点から400km 以内のK-NET、KiK-net、JMA 観測点であり、近畿・中部地域を中心とした領域を対象とした。その結果、5.5節で示すように、過去の南海トラフで繰り返し起こっている過去の地震（安政東海地震（1854年）および昭和東南海地震（1944年））の推定震度を再現でき、また既往の研究成果や経験的距離減衰式^[5-13]の推定最大値とよく対応する予測波形が得られた。

また本論文では、「長周期地震動予測地図」2009 年試作版^[5-14]による想定東海地震の特性化震源モデルの断層パラメータを参考して、想定東南海地震と同じように、三つの大きなアスペリティと背景領域からなる不均質震源モデルを用いて想定東海地震の強震動予測も行う。さらに、包・川瀬^[5-4]は想定南海地震における強震動予測を推定しているので、ここではその南海地震の震源モデルと本論文で構築した想定東南海地震、想定東海地震のモデルを用いて、3 領域に渡ってカスケード的に破壊が進展するものとして3連動型巨大地震の震源モデルを設定する。図5-3と表5-1、例として想定東海地震の震源モデルおよび震源パラメータを示す。3連動型巨大地震では、破壊開始点を紀伊半島の南方沖に設置し、対象地点での強震動波形を破壊開始時間の差を考慮して重ね合わせる。解析した地点は、東海・東南海、南海地震の震源モデルのアスペリティと背景領域の中心点から 400km 以内の K-NET, KiK-net, JMA 強震観測点であり、西南日本地域を中心とした領域を対象とした。

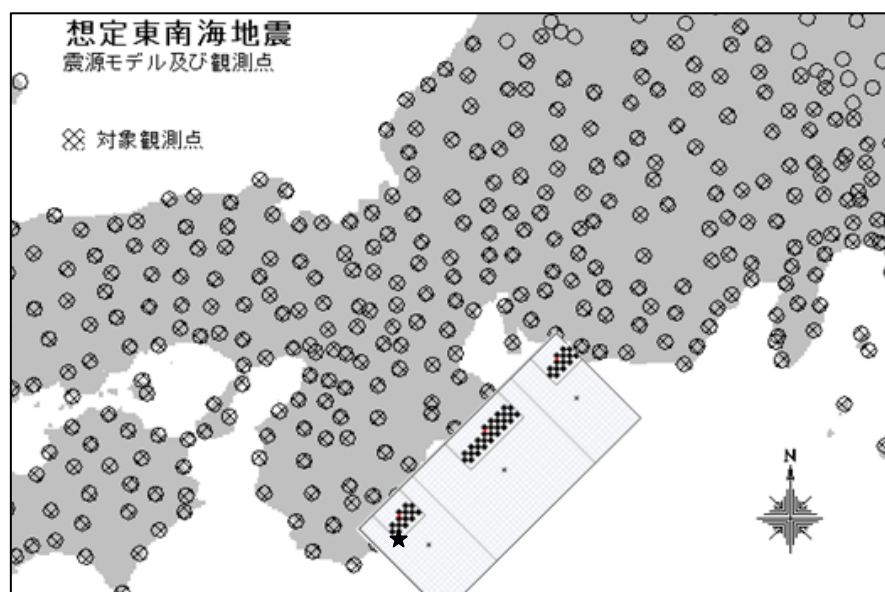


図 5-3 想定東南海地震の震源断層でのアスペリティ位置，アスペリティ中心点（赤色マーク），背景領域中心点（黒色マーク）と破壊開始点（★）

表 5-1 想定東南海地震の断層パラメーター

マグニチュード(M)	8.1					
全面積(km ²)	14040					
地震モーメント(N・m)	2.119E+21					
平均応力降下量(Mpa)	3.0					
せん断剛性率(N/m ²)	4.090E+10					
破壊伝播速度(km/s)	2.7					
破壊伝播形式	放射状					
	断層面 1		断層面 2		断層面 3	
サイズ(km)	78*48		78*90		78*42	
面積(Km ²)	3744		7020		3276	
走向(θ)	250.7		250.7		250.7	
傾斜角(δ)	14.0		14.0		14.0	
すべり角	122.7		122.7		122.7	
	アスペリティ 1	背景領域 1	アスペリティ 2	背景領域 2	アスペリティ 3	背景領域 3
地震モーメント(N・m)	1.416E+20	3.874E+20	4.005E+20	7.176E+20	1.416E+20	3.302E+20
面積(km ²)	576	3168	1152	5868	576	2700
平均すべり量(cm)	601	299	850	299	601	299
実効応力(Mpa)	20.1	2.7	20.1	2.7	20.1	2.7
立ち上がり時間(sec)	1.80	0.50	2.50	0.50	1.80	0.50

5.4 想定波形の合成方法

既に推定した海溝型地震の震源特性と伝播特性及び対象観測点ごとのサイト特性を用いて Irikura^[5-12]の経験的グリーン関数法で想定東南海地震の強震動波形を合成する。その経験的グリーン関数法は、 ω^{-2} 相似則^[5-15]に基づき、大地震と小地震の応力降下量の違いを考慮した波形合成法であり式 (5.4.1) で表現される。

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (r/r_{ij}) \cdot F(t) * (C \cdot u_{ij}(t)) \\
 F(t) &= \delta(t - t_{ij}) + (1/n') \sum_{k=1}^{(N-1)n'} [\delta\{t - t_{ij} - (k-1)T/(N-1)n'\}] \\
 t_{ij} &= (r_{ij} - r_o)/V_s + \xi_{ij}/V_r
 \end{aligned} \tag{5.4.1}$$

ここで $U(t)$ は大地震に対する合成波形、 $u(t)$ は小地震の観測波形、 N は大地震と小地震の断層面の長さの比、 C は応力降下量の比であり、 $*$ はたたみ込み積分を意味する。 $F(t)$ は、大地震と小地震のすべり速度関数の違いを表現した補正関数であり、 T は大地震の立ち上がり時間である。 V_s は S 波速度、 V_r は破壊伝播速度を表し、 r は小地震と観測点間の距離、 r_o は破壊開始点と観測点間の距離、 r_{ij} は大地震の断層面上の各要素と観測点間の距離、 ξ_{ij} は破壊開始点と各要素との距離を表す。 n' は重ね合わせによる人為的な振動数成分の影響を避けるための任意の整数である。

補正関数 $F(t)$ について、入倉・他(1997)^[5-16]は合成波形の振幅スペクトルが $1/t(\text{Hz})$ で落ち込みをもつことを避けるため、改良式 (5.4.2) を提案している。

$$\begin{aligned}
 F(t) &= \delta(t - t_{ij}) + \{1/n'(1 - \exp(-1))\} \\
 &\times \sum_{k=1}^{(N-1)n'} [\exp\{-(k-1)/(N-1)n'\} \cdot \delta\{t - t_{ij} - (k-1)T/(N-1)n'\}]
 \end{aligned} \tag{5.4.2}$$

応力降下量は佐藤らの地震モーメントとコーナー周波数の関係式 (5.4.3)^[5-9] から推定した。また、要素地震の重ね合わせ数 N と C は Irikura の式 (5.4.4) と (5.4.5)^[5-12] から求めることにした。

$$\Delta\sigma = \left(\frac{f_o}{4.9 \cdot 10^6 \beta} \right)^3 M_0 \tag{5.4.3}$$

$$N = \left(\frac{M_0}{C \times M_{oe}} \right)^{1/3} \tag{5.4.4}$$

$$C = \frac{\Delta\sigma_o}{\Delta\sigma_{oe}} \tag{5.4.5}$$

5.5 波形合成とその妥当性の検討

5.3 節で推定した海溝型地震の震源特性と伝播特性及び対象観測点ごとのサイト特性を用いて統計的グリーン関数を作成し、それを Irikura^[5-12]の波形合成法で重ね合わせて想定東南海地震、想定東海地震、想定南海トラフ沿いの連動型巨大地震の強震動波形を作成した。

図 5-6～図 5-8 に今回得られた最大加速度・最大速度と司・翠川^[5-13]による水平最大加速度の距離減衰式との比較を示した。想定東南海地震による最大加速度は距離減衰式と概ね一致しているものといえる。一方、司・翠川^[5-13]による速度距離減衰式は表層 30m の平均 S 波速度が 600 m/s での値であり、K-NET、KiK-net の全体の平均 S 波速度は 400m/s 程度であることを考慮した上で比較を行うと、最大速度については全体的に小さいことが分かる。そこで作成した要素地震の観測最大速度を速度距離減衰式と比較してみたところ、やはりこの図と同程度に観測値が小さく得られ、震源スペクトルを利用したこの地震自体の最大速度が有意に小さい地震であったことが分かった。もちろん、統計的グリーン関数を生成する際に、経時特性を加速度波形で決めていることから、その包絡形は主として短周期成分で支配され、やや長周期成分の寄与が大きい最大速度については直接的には何も規定されていないことも影響しているものと考えられるので、今後、データを追加して分離特性の安定性を増大させることとともに、最大速度を支配しているやや短周期からやや長周期帯域の位相特性のモデル化に関して改良を検討する必要がある。ただし、M8.4 クラスの観測最大値は司・翠川^[5-13]の経験的距離減衰式を作成する際のデータベースにはほとんど含まれておらず、この結果自体が外挿であることに注意が必要である。

今回の想定東南海地震の想定強震動から計測震度を求めた震度階級と地震調査研究推進本部の公開資料^[5-17]による想定東南海地震における県庁所在地等の震度試算結果を図 5-9 に比較して示した。今回の震度階級の震度 6 弱及び震度 6 強相当以上が推本の最高ランク震度 6 弱相当以上と対応するもので、その他はほぼ同じ階級で表示している。本論文で用いた想定東南海地震の強震動は、断層近傍ではレベルが飽和する現象や地盤非線形特性などを考慮していないこと、地震調査研究推進本部による図に記述されているように震源特性には不確実性があり、また設定した地盤構造はたとえ同一市町村でも場所によるばらつきは避けられないので、震度階級で 1 は上や下になることがあることを前提として両者を比較すれば、全体的な震度階級分布はよく一致していると言える。図 5-10 には、想定東海地震の想定強震動から計測震度を求めた震度階級を安政東海地震の推定震度ランクと比較して示す。

本研究では、想定南海トラフ沿いの 3 連動型巨大地震については、想定東南海地震、想定東海地震および想定南海地震が連動して発生した場合を想定し、それぞれの地震によって想定される強震動を破壊開始時刻の時間遅れを考慮して時刻歴で足し合わせて合成した。想定南海トラフ巨大地震の強震動については、包・川瀬^[5-4]が長周期まで有効な統計的グリーン関数を用いて予測した方法に倣って合成した想定強震動を用いた。図 5-11 には算定した合成波形の計測震度から求めた震度階級と中央防災会議の公開資料^[5-18]による南海トラフの巨大地震による震度分布（陸側ケース）を比較して示す。今回得られた震度階級では震度 6 強相当以上と推定された観測点の分布は、主として高知県、徳島県、和歌山県、三重県、愛知県、静岡県などの海岸地域と河沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかいところに集中している。宮崎県東部の海岸地域では中央防災会議の推定震動分布より少し小さく駿河湾周辺ではより少し大きい評価になっているが土佐湾、徳島県東部、和歌山県西部と南部、伊勢湾から三河湾にかけての海岸地域では中央防災会議の推定震動分布とほぼ一致する予測結果が得られた。

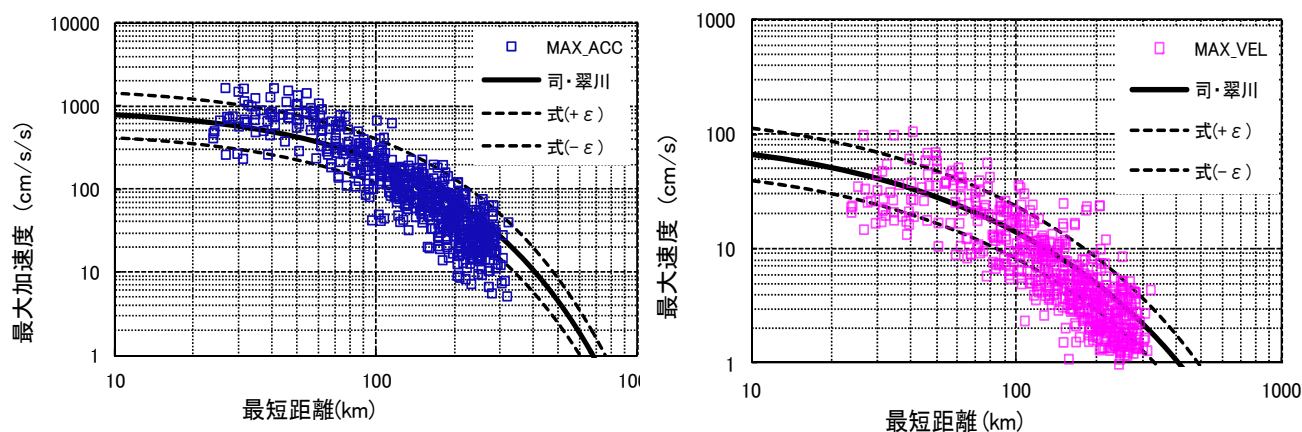


図 5-6 想定東南海地震による最大加速度・最大速度

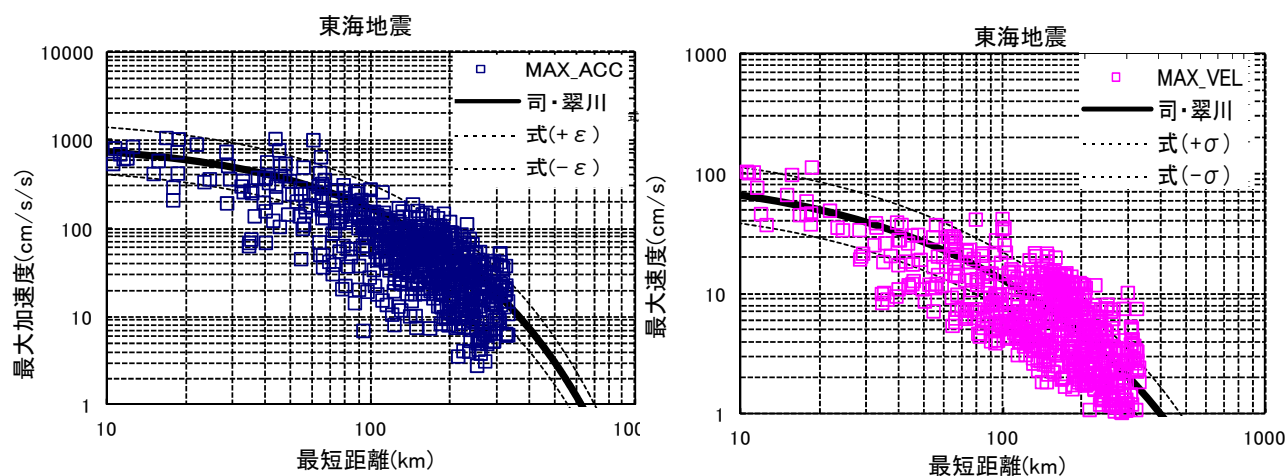


図 5-7 想定東海地震による最大加速度・最大速度

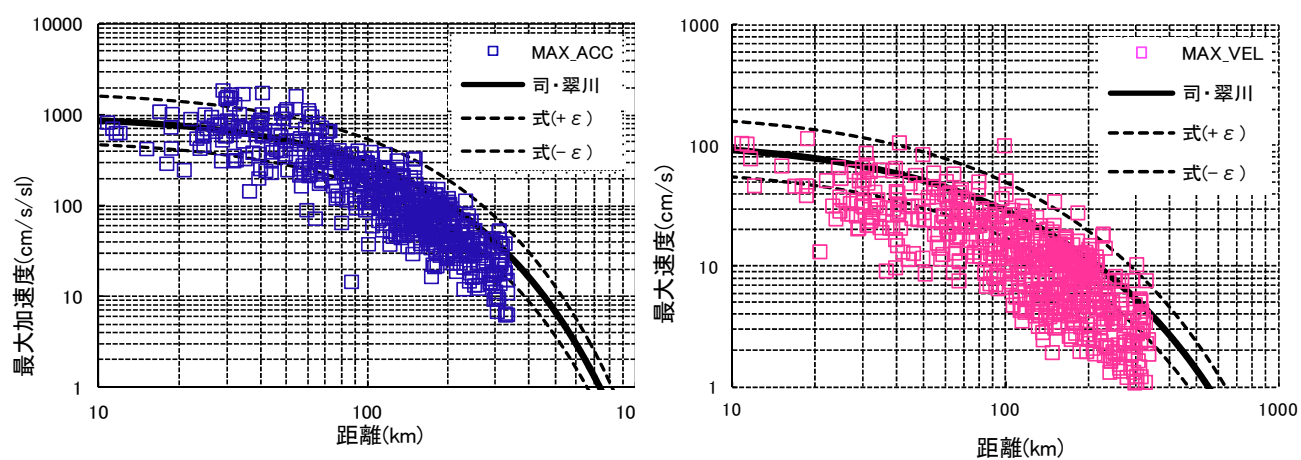


図 5-8 想定南海トラフ沿いの 3 連動型巨大地震による最大加速度・最大速度

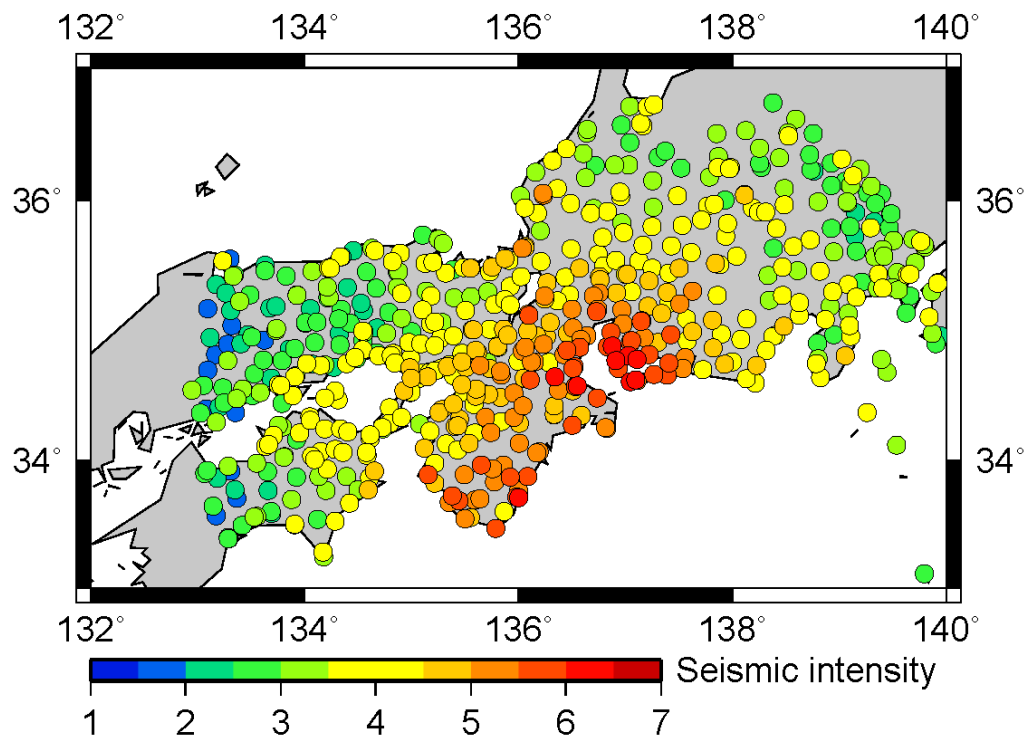
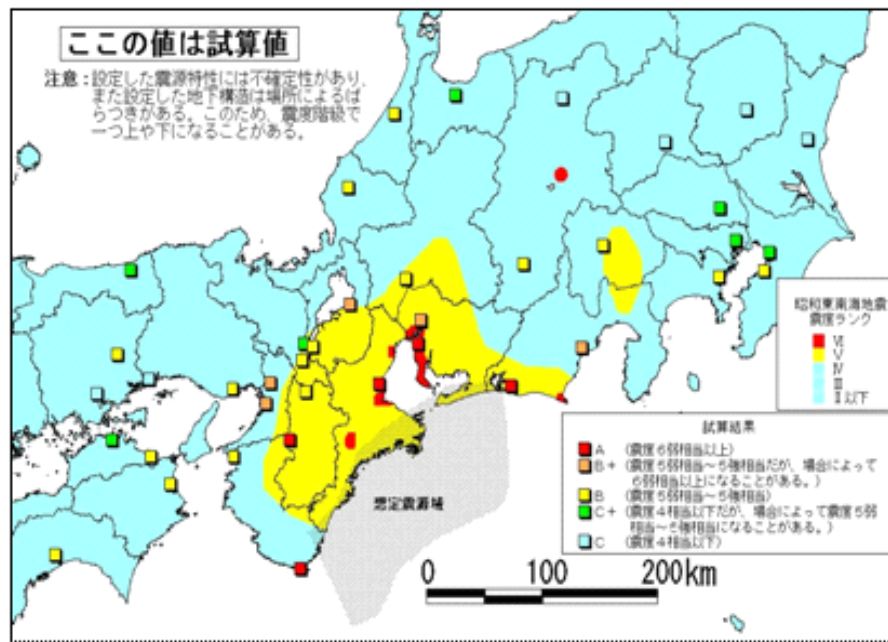


図 5-9 想定東南海地震の強震動による計測震度階級分布 (下), 1944 年昭和東南海による推定震動分布や地震調査研究推進本部の想定東南海地震における県庁所在地等の震度試算結果 (上) (図に□で表す)

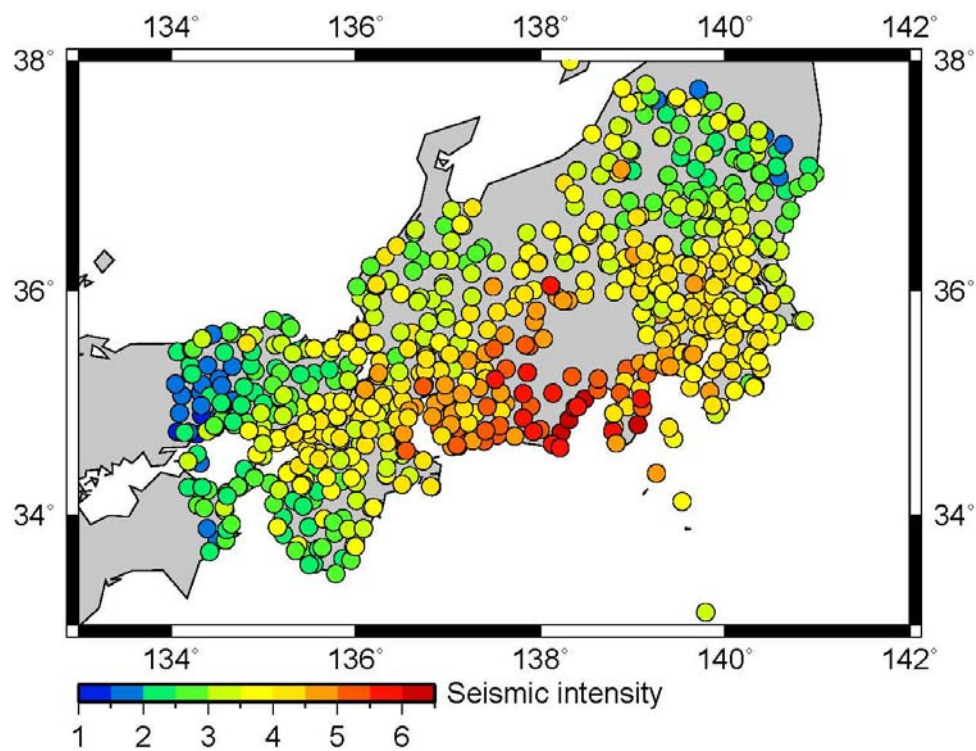
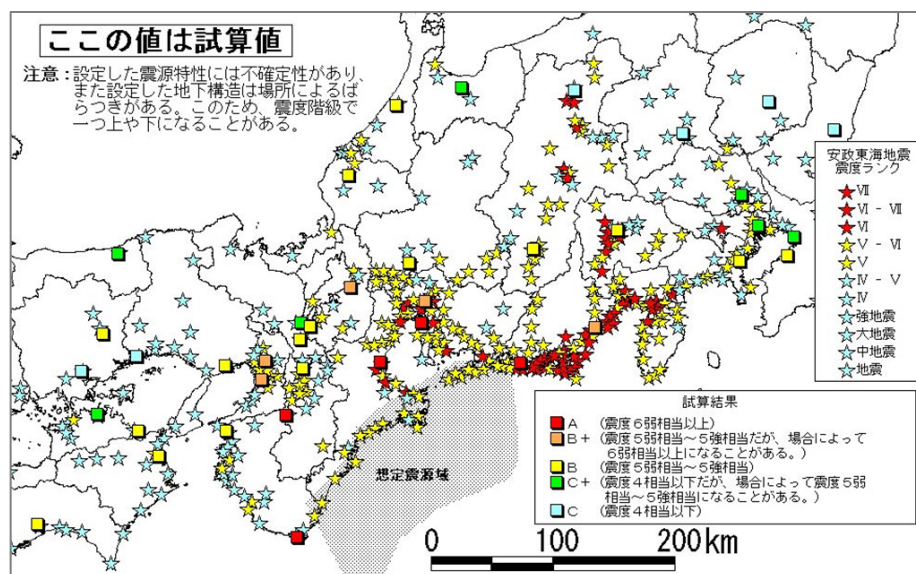
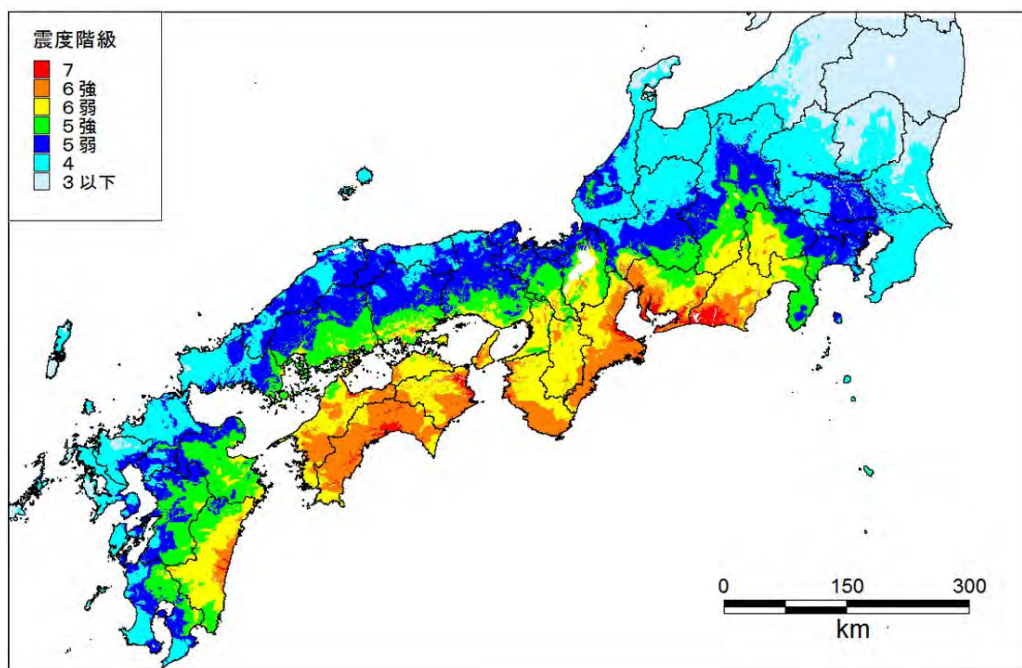


図 5-10 想定東海地震の強震動による計測震度階級分布（下），1854 年安政東海地震による
推定震動分布（上）（図に☆で表す）



陸側ケースの震度分布

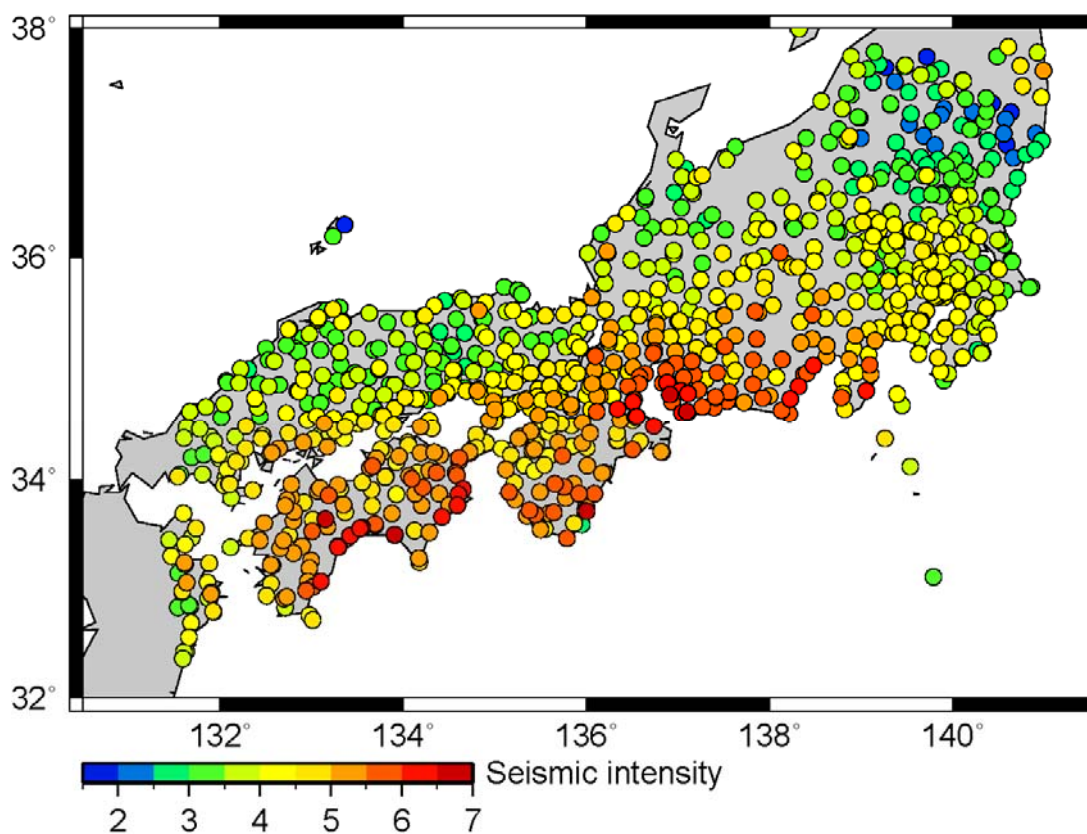


図 5-11 想定南海トラフ沿いの3連動型巨大地震による計測震度階級分布（下），
中央防災会議が出した陸側ケースの震動分布（上）

5.5 第5章のまとめ

三つの大きなアスペリティと背景領域からなる不均質震源モデルを用いて想定東南海地震の強震動予測を行った得られた統計的グリーン関数を用いて想定南海地震による西日本における強震動を試算した。その結果、予測した強震度波形の形状と震度階級の分布は過去の地震や研究成果とほぼ一致していた。また、得られた最大加速度・最大速度と経験的距離減衰式と比較したところ最大加速度はよく一致しているのに対し、最大速度は全体的に過小評価傾向となっていることが分かった。要素地震の最大速度自体が観測も統計的グリーン関数も小さめであり、その震源スペクトルが平均的なものではない可能性があるが、同時に本手法では強震動を作成する時に、やや長周期成分の寄与が大きい最大速度そのものについては直接的には何も規定されていないことにも関係している可能性が考えられる。全体的な結果を総合すると、本論文で応用した内陸地震とプレート間地震、プレート内地震の三タイプ、また日本全域を六つの地域に分けてその平均的地震特性を抽出して作成した包・川瀬^[5-4]の長周期まで有効な統計的グリーン関数は概ね妥当なものであるといえる。

今回得られた震度階級では震度 6 強相当以上と推定された観測点の分布は、主として高知県、徳島県、和歌山県、三重県、愛知県、静岡県などの海岸地域と河沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかいところに集中している。宮崎県東部の海岸地域では中央防災会議の推定震動分布より少し小さく駿河湾周辺ではより少し大きい評価になっているが土佐湾、徳島県東部、和歌山県西部と南部、伊勢湾から三河湾にかけての海岸地域では中央防災会議の推定震動分布とほぼ一致する予測結果が得られた。

第5章の参考文献

- [5-1] 地震調査研究推進本部，南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について：
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm, 2013.5.
- [5-2] 松島信一・川瀬 博：1995年兵庫県南部地震での神戸市域における強震動と木造建物被害の再評価，
日本建築学会構造工学論文集，Vol.55B，537-543，2009.4.
- [5-3] 伊藤茂郎・川瀬博：統計的グリーン関数法による強震動予測法の検証と仮想福岡地震への適用，
日本建築学会構造系論文集，第540号，pp.57-64，2001.2.
- [5-4] 包那仁満都拉，川瀬博：強震ネットワークデータから構築した広周波数帯域統計的グリーン関数
とその南海地震への応用，日本地震工学会論文集，第7巻，第2号（特集号），2007.
- [5-5] 釜江克宏：半経験的手法による強震動予測，20XX年の南海地震を考えるシンポジウム，建築学会近
畿支部，pp.9-23，2002.
- [5-6] Boore, D. M. : Stochastic simulation of high frequency ground motions based on seismological
models of the radiated spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.73, No.6, 1865-1894, 1983.
- [5-7] 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明：観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考
慮した強震動予測，日本建築学会構造系論文集，第463号，27-37，1994.
- [5-8] Dan et al. : A semi-empirical method to synthesize earthquake ground motions based on
approximate far-field shear-wave displacement, Journal of Structural and Construction
Engineering(Transactions of the Architectural Institute of Japan), No.396, 27-36. 1989.
- [5-9] 川瀬博・松尾秀典：K-NET, KiK-Net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サ
イト各特性の分離解析，日本地震工学会論文集，第4巻，第1号，pp.33-52，2004.2.
- [5-10] Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse: Determination of earthquake source
parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, J. Geophys.
Res., 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825,
(<http://www.seismology.harvard.edu/projects/CMT/> 1976-2003).
- [5-11] 福山英一・石田瑞穂・D. S. Dreger・川井啓廉：オンライン広帯域地震 波形を用いた完全自動メ
カニズム決定，地震 第2輯，第51巻，第1号，1998，pp:149-156 .
(<http://www.fnet.bosai.go.jp/freesia/index-j.html>).
- [5-12] Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motions using empirical Green' s function,
Proc.7th Japan Earthq. Eng. Symp., pp.151-156, 1986.
- [5-13] 司宏俊・翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本
建築学会構造系論文集，第523号，pp.63-70，1999.9.
- [5-14] 地震調査研究推進本部 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2009年試作版，2009.9.
- [5-15] Aki, K. : Scaling law of seismic spectrum, J. Geophys. Res., Vol.72, No.4, pp.1217-1231, 1967.
- [5-16] 入倉孝次郎・香川敬生・関口春子：経験的グリーン関数法を用いた強震動予測方法の改良，日本
地震学会講演予稿集，No.2，B25，1997.
- [5-17] 地震調査研究推進本部：地震調査委員会強震動評価部会「南海トラフの地震の長期評価につい
て」, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01sep_nankai/index.htm, 2002.

[5-18] 中央防災会議東南海・南海地震等に関する専門調査会：「東南海，南海地震等に関する専門調査会」
(第 10 回)，2004，<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/10/siryou2.pdf>

第 6 章 西南日本海溝型地震による想定地震動に基づいた建物被害予測

6.1 はじめに

6.2 長戸・川瀬による非線形解析モデル群

6.3 入力地震動と建物群の被害予測手法

6.4 西南日本における建物被害予測

6.5 本章のまとめ

第 6 章の参考文献

6.1 はじめに

南海トラフ沿いの西南日本では、100～150 年間隔で繰り返し発生しているM8 クラスの巨大海溝型地震、東海・東南海・南海地震^[6-1]があり、今後 30 年間の発生確率は極めて高いと評価され、人的被害・物的被害が想定されてきた。しかし、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)により、これまで考えてきた震源の想定を根本的に見直すことが求められている。すなわち東北地方太平洋沖地震相当規模となることも考える必要がでてきた。実際に内閣府は平成 24 年 3 月に、南海トラフの巨大地震の震源域と規模をそれぞれ 2003 年公表時の 2 倍と 3 倍にし、各地の震度分布・津波波高の想定を公開した^[6-2]。その後同年 8 月に、津波波高の予測を見直すとともに、物的被害、人的被害による被害想定を発表し、最悪 32 万人の死者が出る可能性があるという想定を示した^[6-3]。このように、東日本大震災で得られた知見を踏まえて、東海地震・東南海地震と南海地震の単独発生に加えて連動発生の場合の強震動予測を行い、それぞれの地震被害を推定することが急務ではあるが、地震被害予測の精度が高くなければ間違った方向に人々を導くことにもなるので、予測強震動に基づき実地震被害で検証されている構造物被害予測手法により高精度な予測が必要である。

そこで本章では、最新の強震動評価手法に基づき、発生が最も懸念されており連動破壊する可能性もある南海トラフ沿いの海溝型巨大地震の東海・東南海地震と南海地震の単独や連動発生時の強震動を定量的に予測した、すなわち、第 5 章で得られた想定東南海地震単独また連動破壊した時の計算強震動を入力地震動として、非線形建物応答解析モデル^[6-4～6-6]による非線形応答解析を行い、西南日本における南海トラフ沿い巨大地震の震源域における建物の構造種別や高さ、建築年代などの特性を考慮したきめ細かい建物被害率分布を計算した。

6.2 長戸・川瀬建物群モデル

想定南海地震による木造建物の被害予測を行うにあたって、ここでは実被害率に基づいた長戸・川瀬建物群非線形応答解析モデル^[6-4~6-6]を用いる。長戸らは兵庫県南部地震による観測被害率と松島・川瀬^[6-7]による再現強震動に基づく地震応答解析から年代区別なしの木造2階建モデル、新・旧耐震と区別したRC造の3階建モデル、6階建モデル、9階建モデル、12階建モデル、鉄骨造の3階建モデル、4階建モデル、5階建モデルなど合計15個の非線形応答モデルを構築している。木造建物モデルのクライテリオンに関しては、新耐震と旧耐震の建築年代によらず同じで、最大層間変形角が $1/10\text{rad}$ 以上になった場合に大破以上の被害を受けたものとし、そのほかのRC造建物、鉄骨造建物は新耐震と旧耐震の建築年代に区別しており、最大層間変形角で $1/30\text{rad}$ 以上になった場合に大破以上の被害を受けたものと仮定している。また、それぞれのモデルに対しては、建物の耐力のバランスを考慮して耐力が小さいモデル、標準モデル（最頻値モデル）、耐力が大きいモデルなど12個のモデルが含まれており、それらのモデルの応答結果から被害率を出している。図6-1では長戸らの建物群モデル構築のフローを示し、そのほかの詳細設定に関しては文献^[6-4~6-6]を参考して頂きたい。図6-2～図6-4には長戸・川瀬の論文から兵庫県南部地震による木造建物群・鉄筋コンクリート造旧耐震・鉄鋼造旧耐震建物群モデルの解析及び観測被害率分布を引用して示しておく。

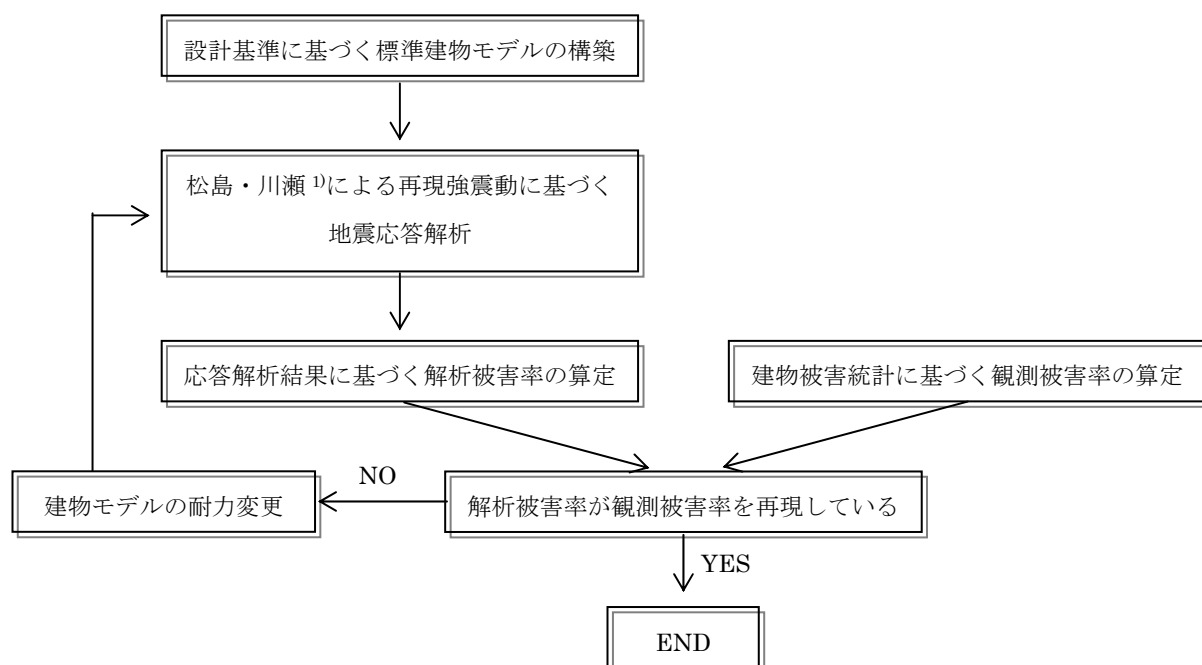


図 6-1 長戸・川瀬建物群モデル構築のフロー

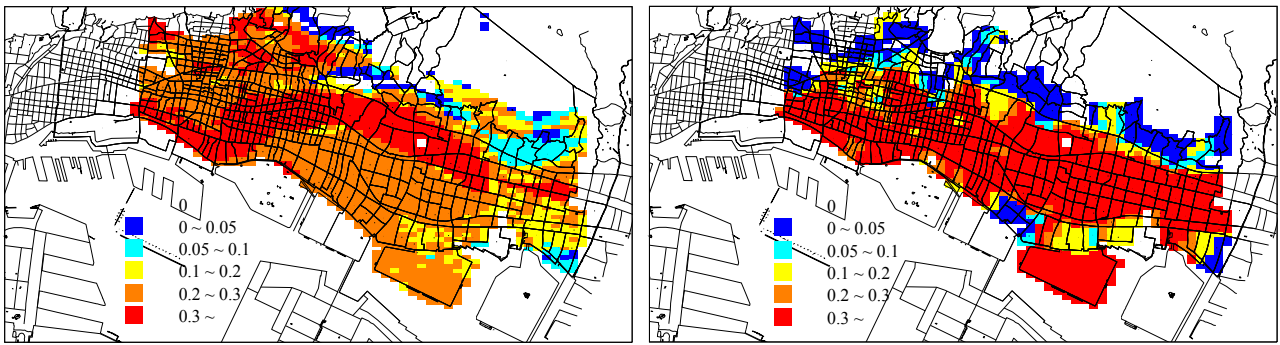


図 6-2 兵庫県南部地震による建物群モデルの解析及び観測被害率分布（木造建物群）^[6-6]
（左は、解析被害率、右は、観測被害率）

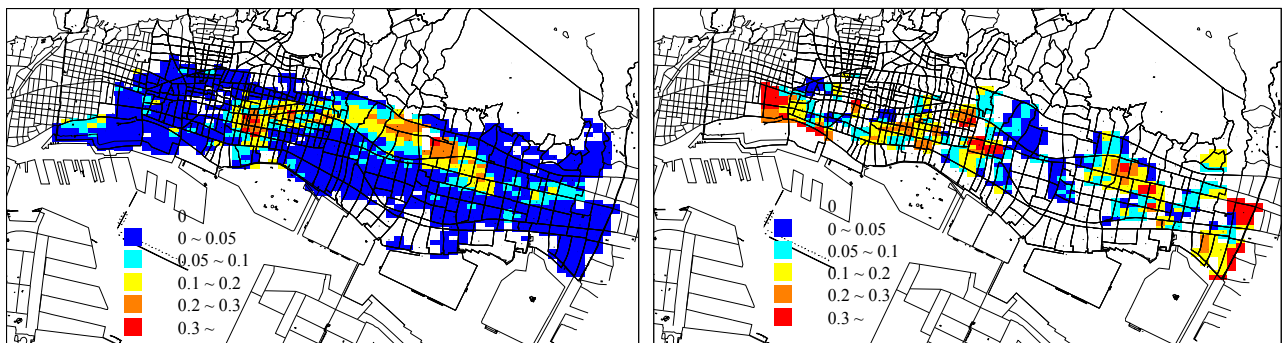


図 6-3 兵庫県南部地震による建物群モデルの解析及び観測被害率分布（RC 造旧耐震）^[6-4]
（左は、解析被害率、右は、観測被害率）

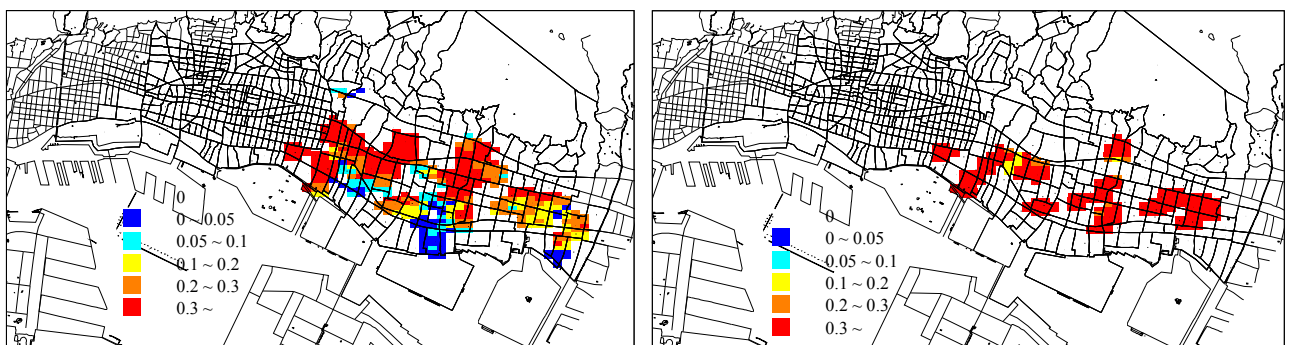


図 6-4 兵庫県南部地震による建物群モデルの解析及び観測被害率分布（鉄骨造旧耐震）^[6-5]
（左は、解析被害率、右は、観測被害率）

6.3 入力地震動と建物群の被害予測手法

入力地震動としては第 5 章で構築した南海トラフ沿いの海溝型巨大地震である、東南海地震と 3 連動型巨大地震により引き起こされる推定強震動の加速度波形を用いる。これまでに解析した経験から最大加速度が 200 Gal 以下ではほとんどの建物には大破以上の被害が生じないことから、想定東南海地震と連動型の震源域から 400 km 以内の K-NET、KiK-net、JMA 観測点における予測最大加速度が 200 Gal 以上になる地点の波形を選んで入力地震動とする。なお、本章以降の被害分布図の中では、入力地震動が 200Gal 以下の観測点で計算を省略した地点を黒色シンボルで、計算したが無被害と推定された地点は白丸で表示して区別している。

想定東南海地震及び想定南海トラフ沿い連動型地震による建物の被害予測を行うに当たって、最大加速度が 200 Gal 以上の観測点に非線形応答解析モデル（長戸・川瀬建物群モデル）が存在すると仮定し、その非線形建物モデルに想定強震動を入力して建物の最大応答層間変形角、建物の大破被害率、建物の変形性状を予測する。

6.4 西南日本における建物被害予測

長戸・川瀬^[6-4~6-6]は兵庫県南部地震による観測被害率と松島・川瀬^[6-7]による再現強震動に基づいて、実被害率を再現できるような年代区別なしの木造建物モデル（2F）、新・旧耐震を区別したRC造モデル（3F, 6F, 9F, 12F）、鉄骨造モデル（3F, 4F, 5F）など合計15個の非線形応答解析モデルを構築している。南海トラフ巨大地震による想定強震動をこの非線形建物応答解析モデルに入力して、西南日本における木造・中低層RC造・鉄骨造建物の被害推定を行った。図6-5～図6-9には、想定東南海地震の強震動による長戸・川瀬モデルから求めた木造2階建て、鉄骨造（3階建て、4階建て）、鉄骨造（5階建て）、RC造（3階建て、6階建て）、RC造（9階建て、12階建て）の新耐震、旧耐震の被害率分布を示す。ただし、木造2階建ては新旧の区別をしない。黒丸（●）は想定強震動が200Gal以下で被害率の計算対象外とした点、白丸（○）は計算の結果として被害率がゼロとなった点を示す。図6-10には、想定東南海地震における応答解析による平均被害率（被害率が計算された観測点）を旧耐震・新耐震、構造別、階数別に比較した。図6-11～図6-15には、同様に想定連動型地震による木造2階建て、鉄骨造（3階建て、4階建て）、鉄骨造（5階建て）、RC造（3階建て、6階建て）、RC造（9階建て、12階建て）の被害率分布を示す。

全体の被害率分布状況を中央防災会議^[6-3]によるの建物被害の分布と比較すると、建物の倒壊棟数が多いところでは算定被害率が高くなっているものの、中央防災会議の方が過大な評価になっている。木造建物とRC造建物の想定南海地震による被害率では、鉄骨造建物が一番高く、次に木造建物であり、RC造建物が一番小さい結果になっている。これには海溝型地震の波形が持っている特性と構造物の耐力の特性の両方の影響が現れているものと考えられる。

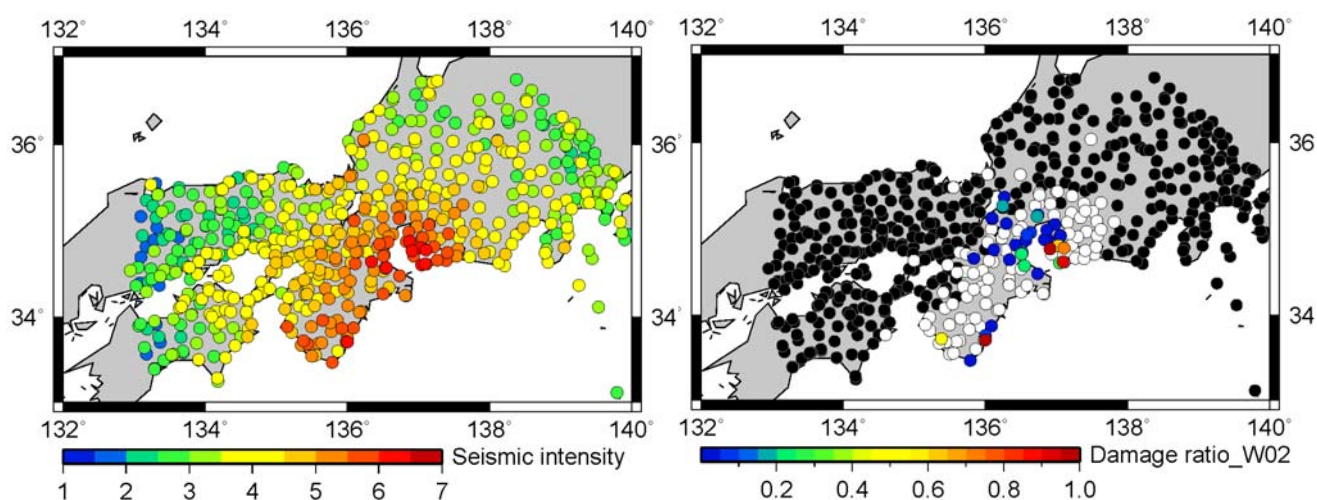


図 6-5 想定東南海地震による長戸・川瀬モデルから求めた木造 2 階建て被害率分布
(左は、想定東南海地震における計測振動，右は、年代別なし木造 2 階)

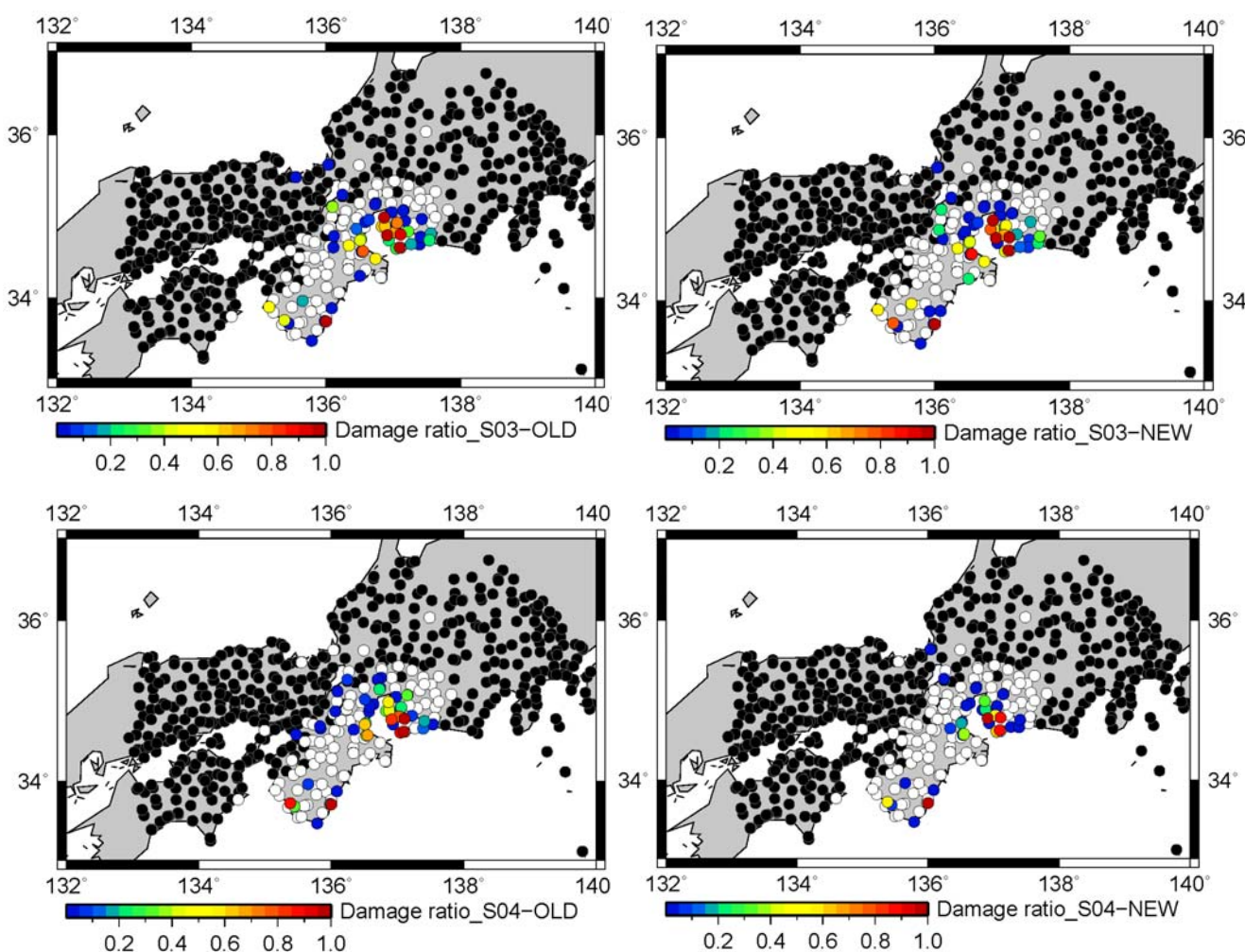


図 6-6 想定東南海地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（鉄骨造旧耐震，
上は 3 階建て、下は 4 階建て）（左は、旧耐震推定被害率，右は、新耐震推定被害率）

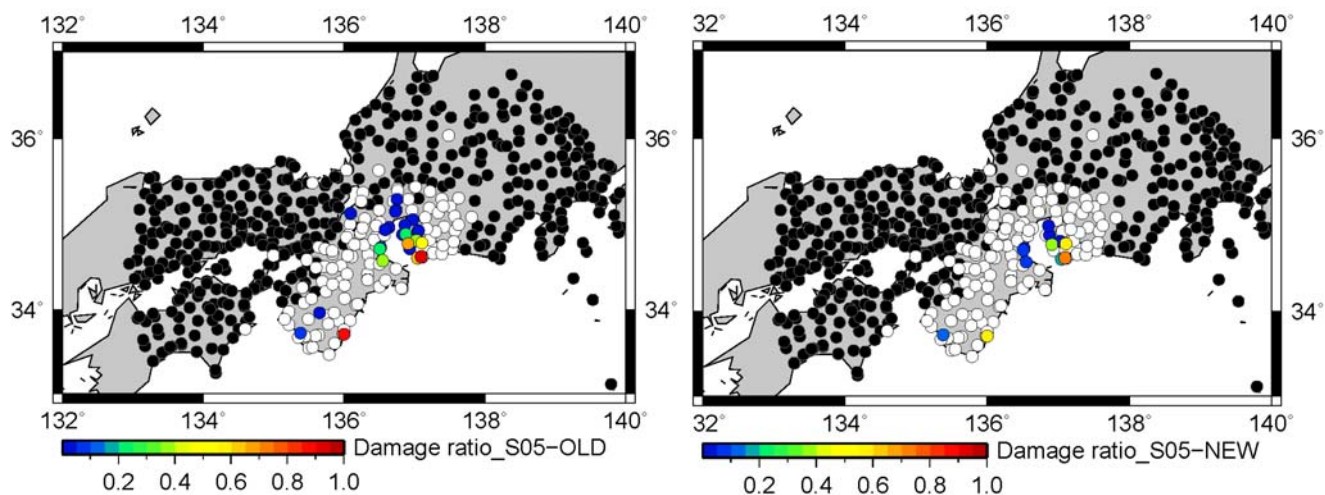


図 6-7 想定東南海地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（鉄骨造，5 階建て）
（左は，旧耐震推定被害率，右は，新耐震推定被害率）

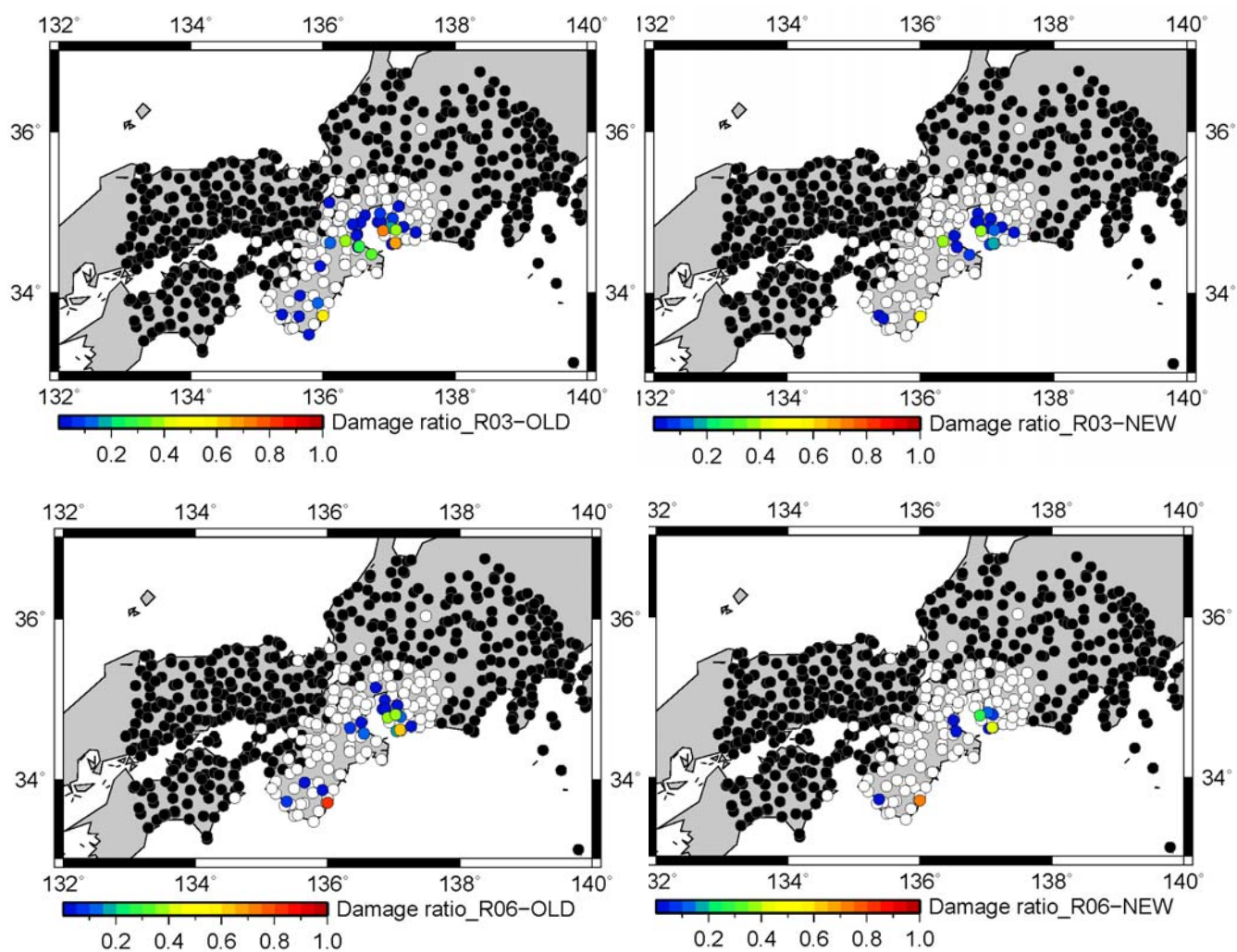


図 6-8 想定東南海地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（RC 造，上は 3 階建て，
下は 6 階建て）（左は，旧耐震推定被害率，右は，新耐震推定被害率）

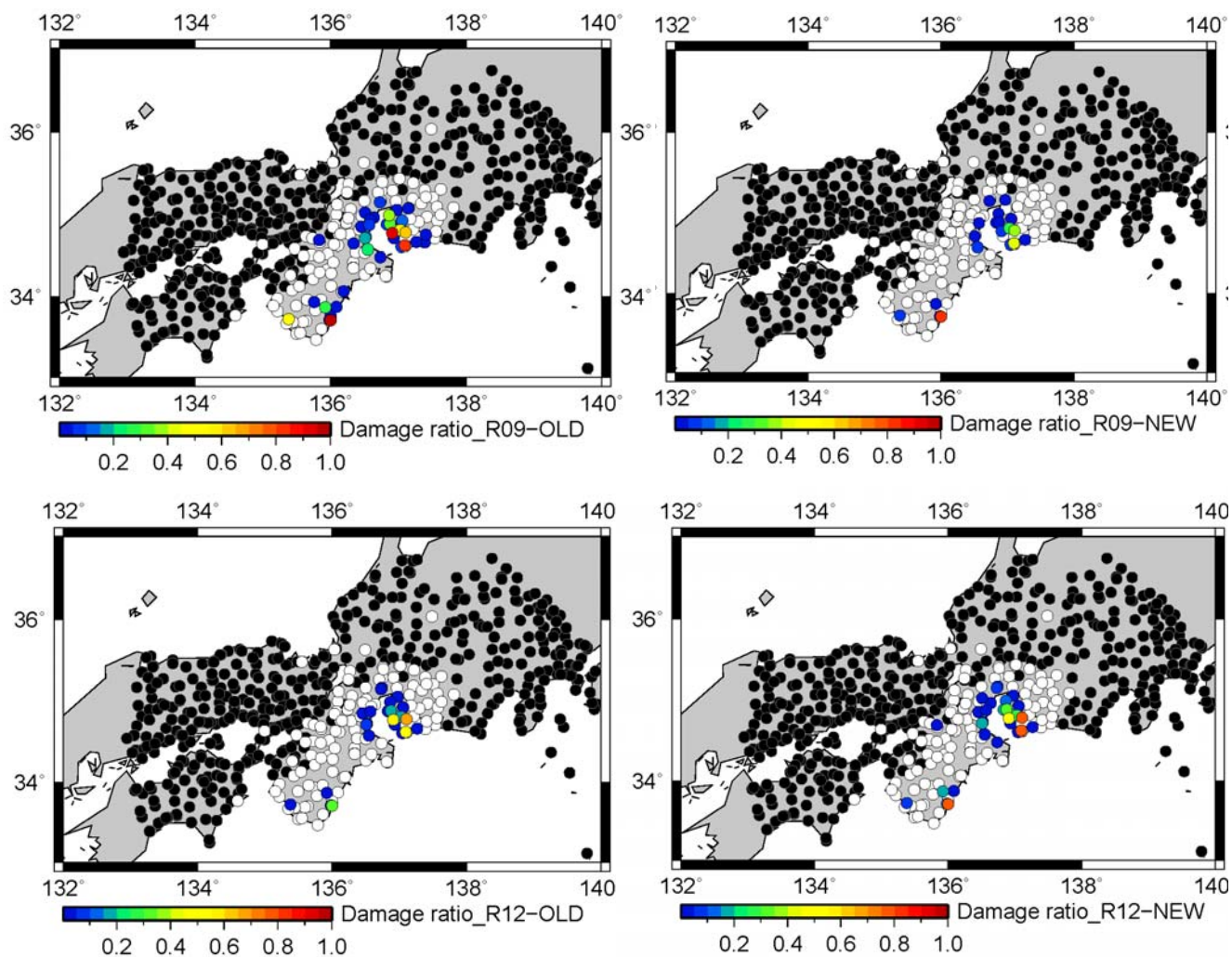


図 6-9 想定東南海地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（RC 造，上は 9 階建て，下は 12 階建て）（左は，旧耐震推定被害率，右は，新耐震推定被害率）

図 6-10 には、想定東南海地震における応答解析による平均被害率（被害率が計算された観測点）を旧耐震・新耐震、構造別、階数別に比較したが、旧耐震は新耐震より被害率が高いこと、階数別では、鉄骨造は低層ほど被害率が高いこと、RC 造では 9 階建が高いことがわかる。構造別では、鉄骨造建物が一番高く、次は木造建物、鉄筋コンクリート造建物の順となることが分かった。

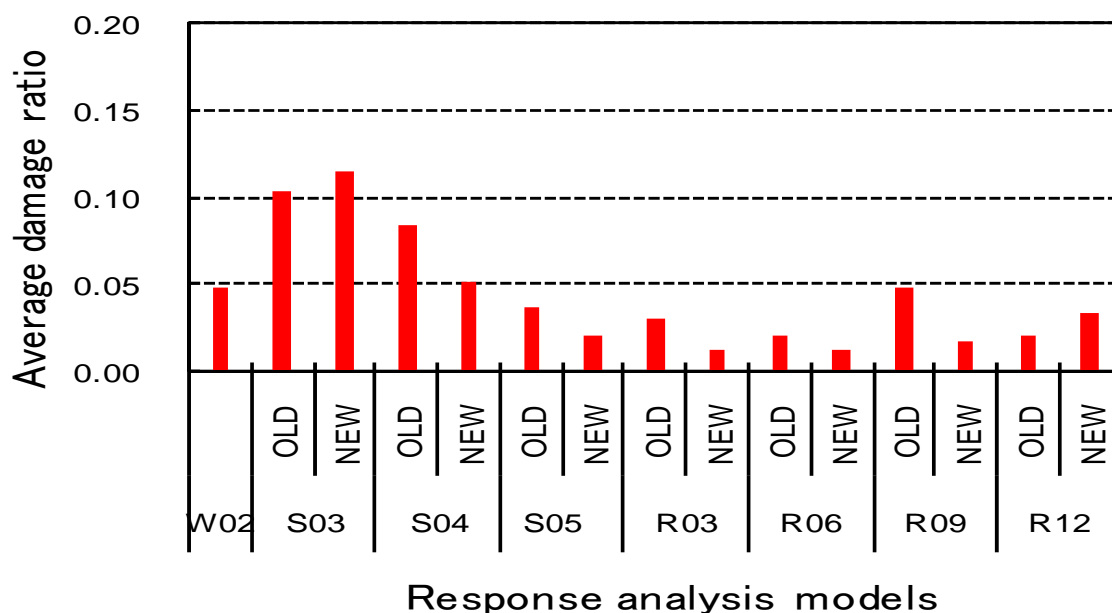


図 6-10 応答解析による平均被害率を旧耐震・新耐震、構造別、階数別に比較

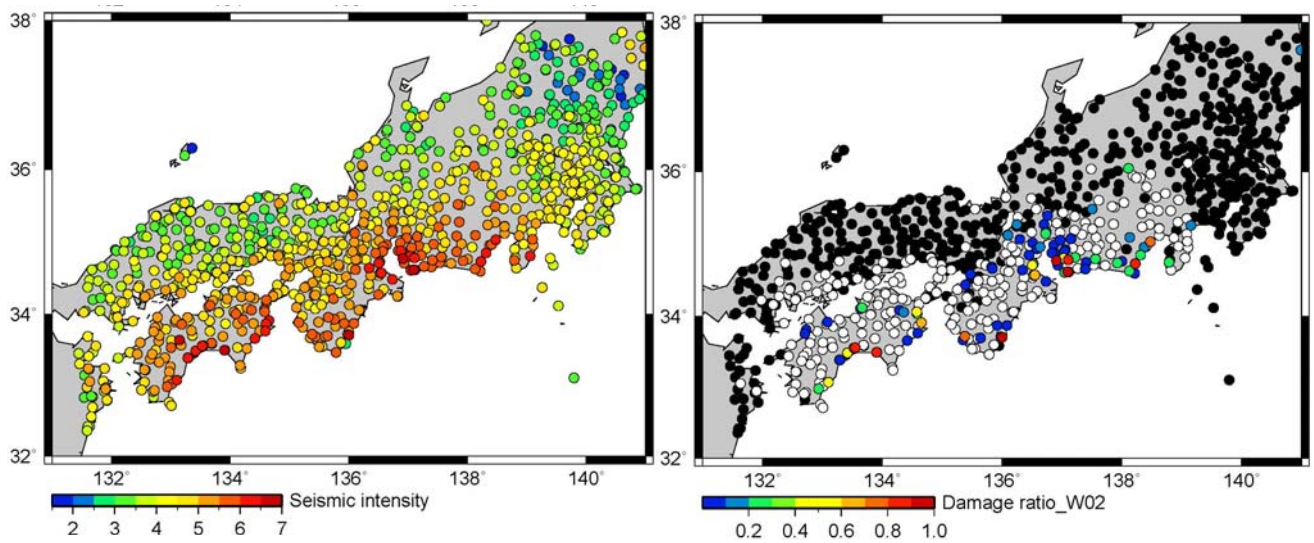


図 6-11 想定連動型地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（木造 2 階建て）
（左は，想定連動型地震における計測振動，右は，年代別なし木造 2 階）

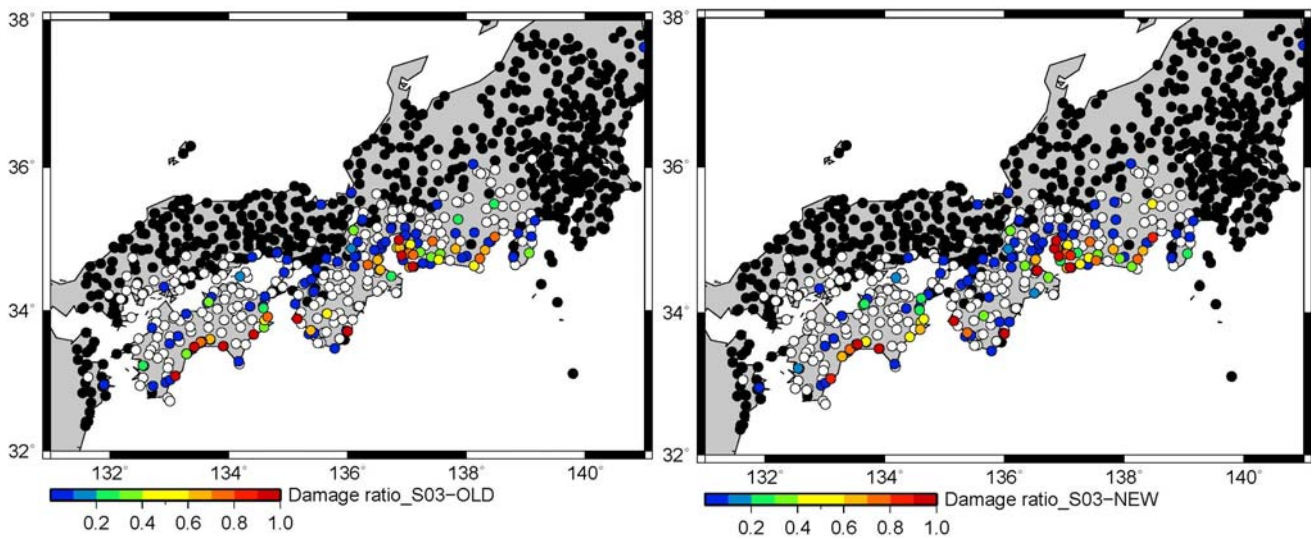


図 6-12 想定連動型地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（鉄骨造 3 階建て）
（左は，旧耐震推定被害率，右は，新耐震推定被害率）

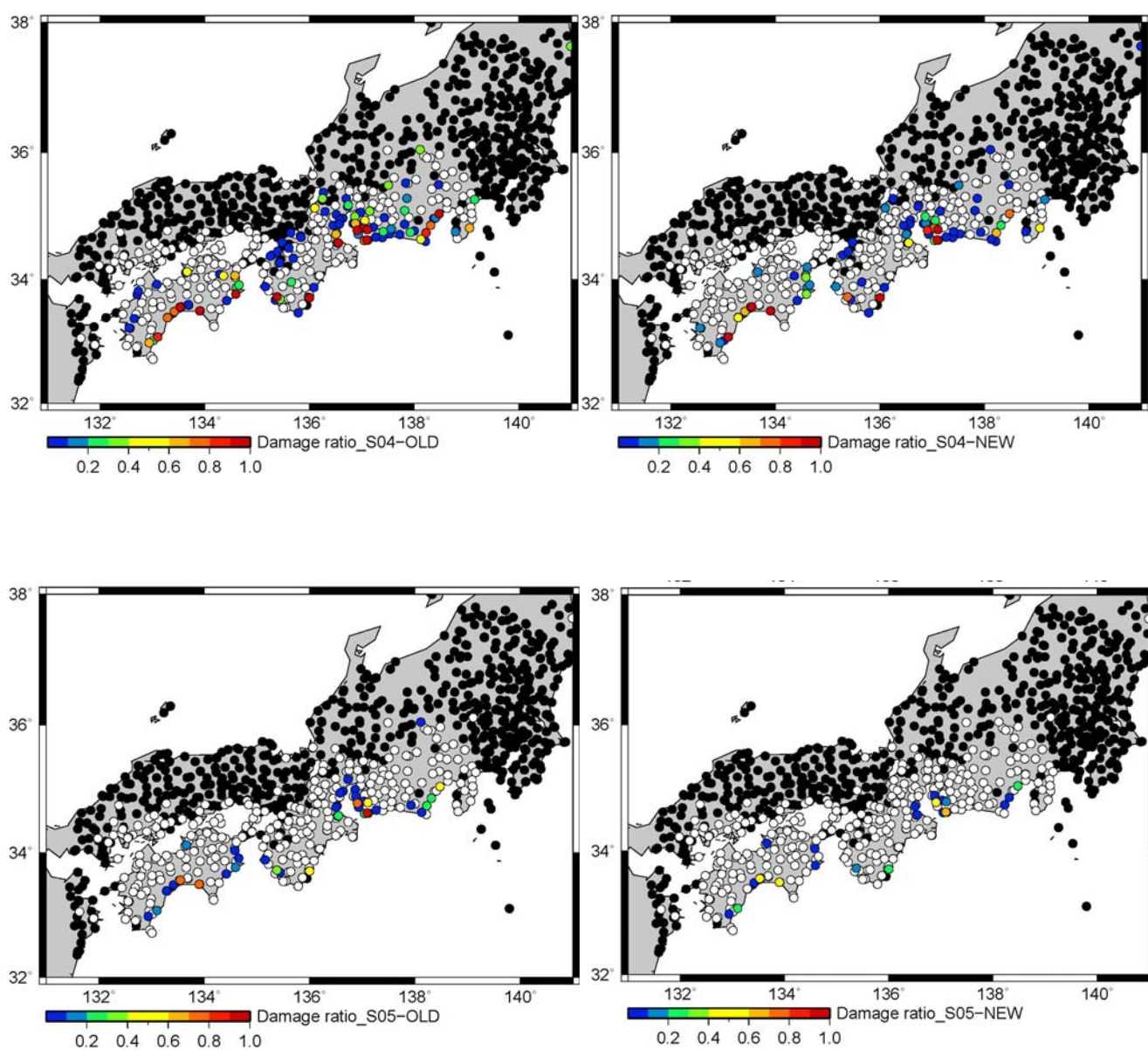


図 6-13 想定連動型地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（上は，S 造 4 階建て，
下は，S 造 5 階建て）（左は，旧耐震推定被害率，右は，新耐震推定被害率）

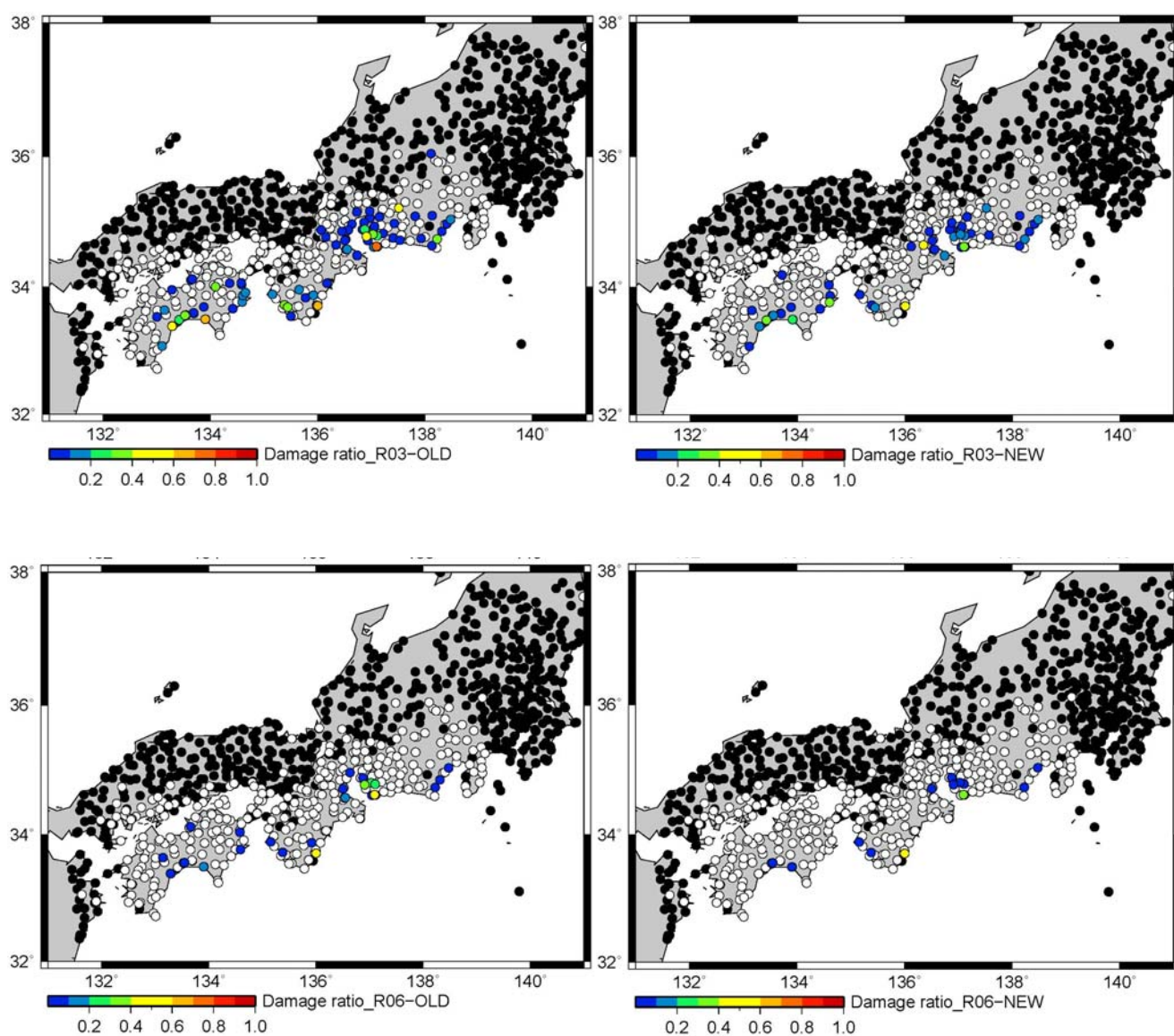


図 6-14 想定連動型地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（上は、RC 造 3 階建て、
下は、RC 造 6 階建て）（左は、旧耐震推定被害率、右は、新耐震推定被害率）

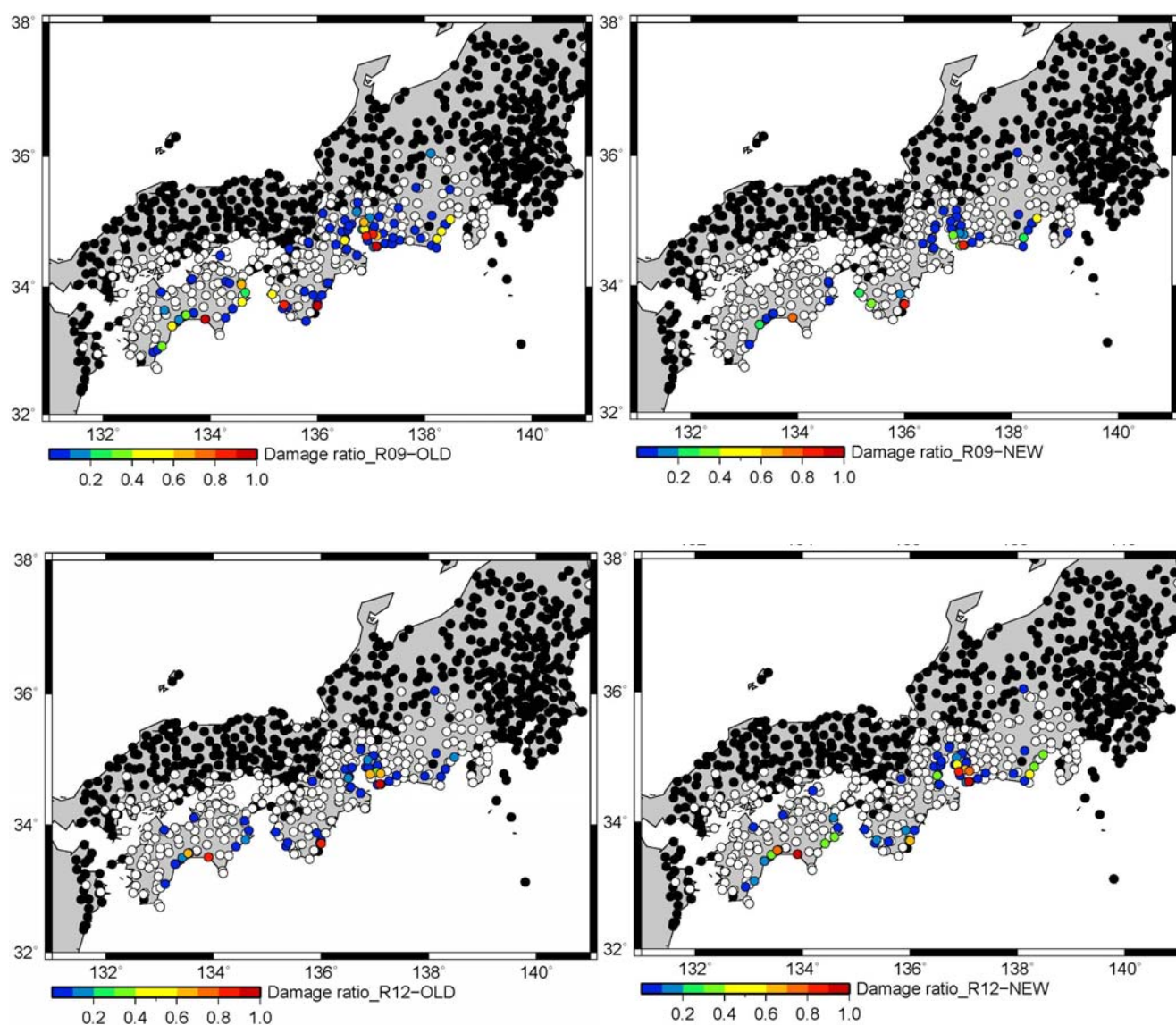


図 6-15 想定連動型地震による長戸・川瀬モデルから求めた被害率分布（上は、RC 造 9 階建て、
下は、RC 造 12 階建て）（左は、旧耐震推定被害率、右は、新耐震推定被害率）

図6-16には、想定東南海地震および想定南海地震（包・川瀬，2007）^[6-8]の推定強震動による長戸・川瀬モデルから求めた木造2階建て、RC造（9階建て）の旧耐震の被害率を、3連動型地震による被害率と比較したが、連動型地震により推定被害率は平均10%以上増えることがわかった。

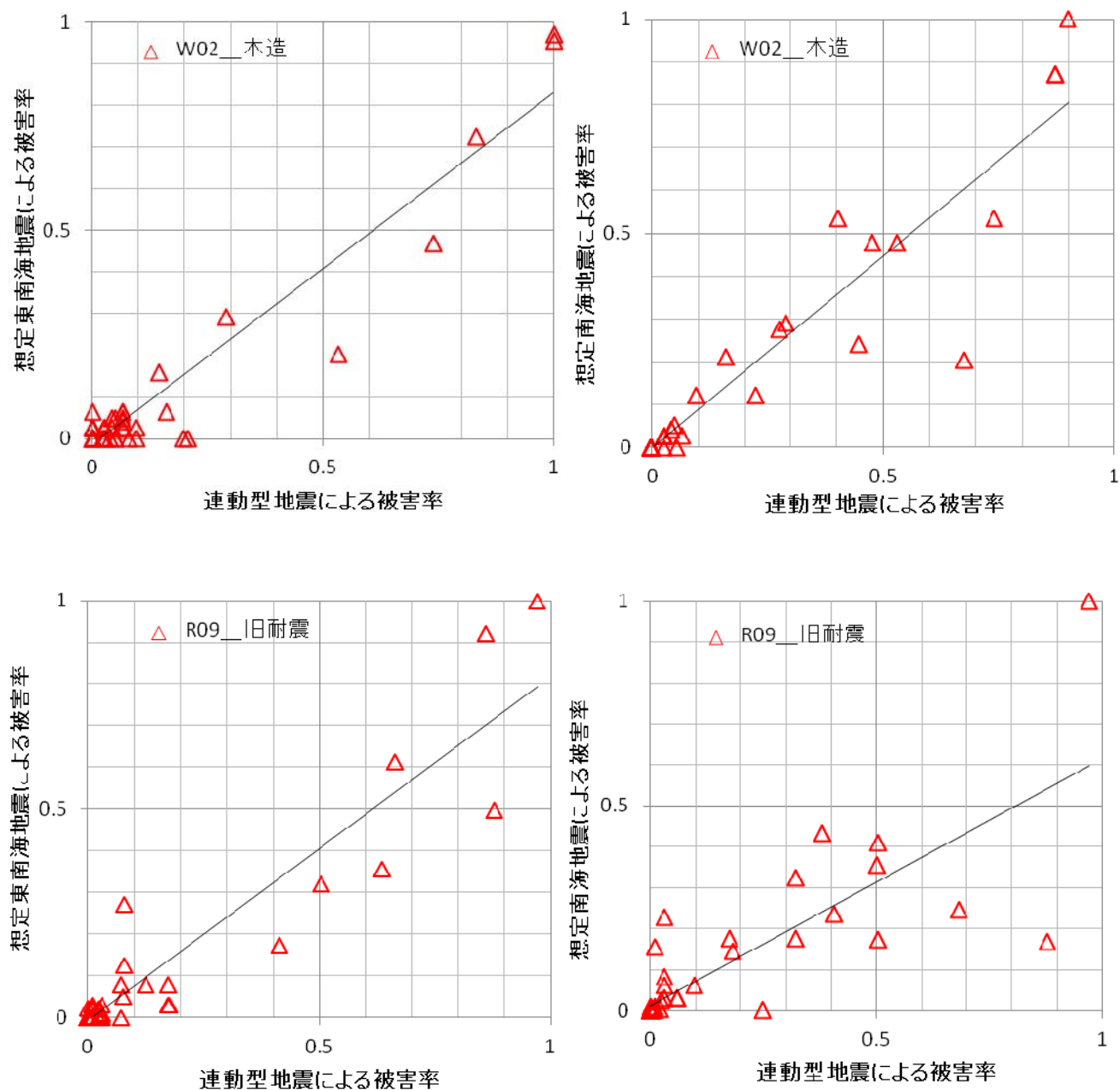


図 6-16 東南海・南海地震による被害率と連動型地震による被害率の比較（上は、木造 2 階建て、下は、RC 造 12 階建の旧耐震）（左は、想定東南海、右は、想定南海地震^[6-8]）

6.5 まとめ

本章では、不均質な破壊様式を持つ震源断層モデルと統計的グリーン関数を用いて想定東南海地震および想定南海トラフ沿いの連動型巨大地震による西南日本における強震動を試算した。次に、統計的非線形建物被害予測モデルにこの想定東南海地震及び南海トラフ沿いの連動型巨大地震の強震動を入力して、西日本における木造・RC造・S造建物の被害予測を行った。その結果、高知、徳島、和歌山など震源域を中心に、海岸地域と川沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかいところで大破以上の建物被害が生じる可能性があることが分かった。また構造種類別でみると鉄骨造、木造、RC造建物の順に被害率が小さくなることが分かった。少なくとも耐震補強など東南海地震、南海トラフ沿いの連動型巨大地震に向けた被害対策を立案する上では、その震源近傍か地盤が軟弱であるかどちらかを満たす地域を重点的に対象とすべきであることを指摘した。

周知のように設計上では建物の腰壁や垂れ壁、間仕切り壁など非構造物を含めず、建物耐力に余裕を持たせるのが普通である。また、地震の発生するメカニズムと構造物の種類、震動特性により地震による構造物被害が大きく左右される。そういう理由では、実データに基づく建物モデルを用いて地震応答解析を行うことは地震対策をする上で非常に重要だと考えられる。

南海トラフ巨大地震における強震動予測を推定し、長戸・川瀬建物群モデルに入力して応答解析を行ったところ、震源域から近い所や海岸地域と川沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかいところでは建物種別を問わず、大破以上の被害を受ける可能性があることが分かった。計算被害率が大きくなる地点が必ずしも震源から近いところではないこと、同じ地点でも構造種別や高さ、建築年代により推定される被害は異なることがわかった。また、旧耐震は新耐震より被害率が高いこと、構造別では、鉄骨造建物が一番高く、以下木造建物、RC造建物の順となることがわかった。

不均質な破壊様式を持つ震源断層モデルと統計的グリーン関数を用いて想定東南海地震による西南日本における強震動を試算した。次に、統計的非線形建物被害予測モデルにこの想定南海地震の強震動を入力して、西日本における木造・RC造・S造建物の被害予測を行った。その結果、高知、徳島、和歌山など震源域を中心に、海岸地域と川沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかいところで大破以上の建物被害が生じる可能性があることが分かった。また構造種類別でみると鉄骨造、木造、RC造建物の順に被害率が小さくなることが分かった。さらに、東南海・南海地震による被害率と連動型地震による被害率を比較したところ、連動型地震により推定被害率は平均10%以上増えることがわかった。少なくとも耐震補強など南海地震に向けた被害対策を立案する上では、南海地震震源近傍か地盤が軟弱であるかどちらかを満たす地域を重点的に対象とすべきであることが指摘できる。

第 6 章の参考文献

- [6-1] 地震調査研究推進本部，南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について，
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm，2013. 5.
- [6-2] 内閣府中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフの巨大地震モデル検討会，南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告），2012. 3.
- [6-3] 内閣府中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフの巨大地震モデル検討会，南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告），2012. 8.
- [6-4] 長戸健一郎・川瀬博：建物被害データと再現強震動による RC 造構造物群の被害予測モデル，日本建築学会構造系論文集，544，31-37，2001. 6.
- [6-5] 長戸健一郎，川瀬博：鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，101-106，2002. 9.
- [6-6] 長戸健一郎・川瀬博：観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と観測強震動への適用，第 11 回日本地震工学シンポジウム，2002. 11.
- [6-7] 松島信一，川瀬博：1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第 534 号，33-40，2000. 8.
- [6-8] 包那仁満都拉，川瀬博：強震ネットワークデータから構築した広周波数帯域統計的グリーン関数とその南海地震への応用，日本地震工学会論文集，第 7 巻，第 2 号（特集号），2007.

第7章 西南日本海溝型地震による建物被害予測に基づいた環境負荷予測

7.1 はじめに

7.2 中・大破建物による CO₂ 排出量の算定手法

7.3 中・大破建物による廃棄物量の算定手法

7.4 想定南海トラフ沿いの巨大地震における CO₂ 環境負荷と廃棄物量の算定

7.4.1 単独発生の場合

7.4.2 連動型発生の場合

7.5 本章のまとめ

第7章の参考文献

7.1 はじめに

人類史上、天然資源の大量使用とそれに伴う環境悪化は今日の近代文明を維持する限り避けられない部分である。しかし発展を続ける産業経済社会における人類の営みを地球が受容しきれなくなりつつある。そのなかでも住空間の安全性、特に耐震性とそれに伴うコスト、災害発生による環境負荷の社会的スケールでの評価が極めて重要である。例えば、安全な建物は被災危険度を減少させ、少ない社会的損害費用を予想することができる。一方、過度に安全な建物は材料をより多く使い、環境負荷が高くなる。都市スケールで最適化するためには、適切な安全性と環境負荷のバランスを考えなければならない。日本全産業のCO₂排出量の約1/3と廃棄物量の約1/5を占めている建設業界における環境負荷削減の努力や対策は極めて重要である。従って、建築分野では「建設分野における生涯CO₂排出量を30%削減、建築物の耐用年数を3倍（100年）に延長する」とする学会声明^[7-1]、建物のLCA方針やデータベースの公開^[7-2, 7-3]、建築関連による環境負荷の予測及び削減に関わる研究が多数行なわれている^[7-4~7-9]。

地震被害による環境負荷は二つの視点から評価することができる。ひとつは、環境負荷を減少できる耐震対策はどのようなものかを考えることであり、もうひとつは、逆に環境負荷に配慮した耐震設計法を求めることである。建物の資産価値にも影響する建物の総合的な環境性能手法や研究が欧米のみならずアジア諸国にも急速に広まっている^[7-10]。その多くは人間活動に伴う総合的な環境負荷を評価している。しかし災害、特に地震被害による環境負荷の研究は未だほとんどない。その先駆的な研究のひとつ、神田^[7-13]は建物の地震危険度、強風危険度、および環境負荷の評価を目的として検討している。しかし、災害による環境負荷リスク低減の問題は個別建物の問題としてではなく、国家的・社会的な観点から最適化されるべきものである。例えば、包・川瀬^[7-11]・川瀬・包^[7-12]らの一連の研究では、南海地震を対する都市に存在する種類も様々な建物群を対象にして、地震災害による環境負荷予測を行い、地域トータルのライフサイクルコストやライフサイクル負荷の形でこれを評価し、しかもその被災確率に与える耐震性能向上の施策の効果をモデルに考慮することにより、長期にわたる都市の災害環境負荷リスクを評価できるモデルを構築しており、都市における地震防災対策の立案において、より有効な提案に向けて検討を行っている。

本章では、被害地震によって建物が破壊されると、その建て替えや修復に大量の資源やエネルギーが使われるだけでなく、大量の災害廃棄物が発生し、その廃棄物を処理する際にも多くの環境負荷が発生することになるため、第6章で実施した建物の被害率予測結果に基づき、包・川瀬^[7-11]の提案した原単位および建物ストックの統計値情報を用いてその地震被害がもたらす環境負荷量を評価する。具体的には、建物の被害総数に基づく建築廃棄物量、その環境を復元するのに必要な資源及びエネルギー、同時に排出されるCO₂の量などを総合的に算定し、想定南海トラフ沿いの地震が起きた場合に京都議定書に設定したCO₂目標値に比べどのぐらいの環境負荷が発生するかを明らかにする。

7.2 中・大破建物による CO₂ 排出量の算定手法

これから発生する地震によりもたらされる地震動のレベルを予測し、地震動強度指標と建物応答の関係に基づいて建物被害を予測できるようになると、地域の建物被害分布を求めることができる。それを用いて今度は建物の耐震性を増強するか、あるいは取り壊すべきかを判定し、政策的に実施していく必要がある。その判定に際しては、社会コストや人的被害など、様々な視点から評価するべきである。最近特に注目されている視点として、建設投資のもたらす人間環境の豊かさとその確保に必要な環境負荷の関係がある。建物の予測被害率と建物ストックの予測結果に基づいて、ある地震が発生した場合の直接的被害に伴う環境負荷、および間接被害に伴う環境負荷を評価する。そして被害を防ぐための耐震補強にかかるコストと使用材料によって増加する環境負荷を評価し、投資効率からみた各種耐震施策の有効性を検討する必要がある。このような広い視点に立って災害に伴う環境負荷リスクを評価するスキームを構築できれば、単純により安全であればよいとされてきたこれまでの耐震工学・防災工学の方法論よりも、より合理的な政策決定を示唆できるスキームとなる。地域の建物の特性を反映した被害関数を構築することにより、地震災害に脆弱な世界中の地域に対してもこのスキームを適用することが可能とされ、それぞれの国・地域の実情に合わせた地震被害低減施策を提案することを可能にする。

地震災害による CO₂ 排出量は、被害を受ける建物を修復したり建て替えたりすることに伴う CO₂ 以外に、その解体廃棄物や生活用品・被災工場製品などから出るゴミの収集運搬、リサイクル、最終処分に伴っても CO₂ が排出されると考えられる。例えば、鋼のリサイクルによる CO₂ 排出量は 3/5 程度になる^[7-8]と報告もある。しかし、リサイクルや最終処分に伴う CO₂ の評価はその材料別比率が影響し簡単ではない。以上のことから、ここでは廃棄物のリサイクルや最終処理を考慮しないかわりに、大破建物（＝大破と倒壊）を全棟建て替えると仮定する。即ち大破建物の解体、廃棄物運搬、建て替えまでに伴う CO₂ 環境負荷を推定し、また文献^[7-14～7-16]から求めた兵庫県南部地震による大破以上の被害率と中破被害率の比を用いて中破建物の修復に伴う CO₂ 環境負荷も考慮する。表 7-1 はその被害率比を示している。

表 7-1 平成 7 年兵庫県南部地震による大破率と中破率の比^[7-14～7-16]

項目	大破及び全壊率		中破率		大破以上率/中破率	
	-1981	1982-	-1981	1982-	-1981	1982-
木造建物	0.28		0.19		0.65	
S造建物	0.33	0.21	0.28	0.10	0.86	0.46
RC造建物	0.06	0.01	0.04	0.03	0.66	2.10

算定に当たっては、対象観測点における建物の中破・大破被害率とその観測点が位置する市町村の建物ストックの床面積を用いてCO₂環境負荷を算定する。建物床面積は、総務省による新築床面積^[7-17]と残存率曲線^[7-18]に基づき2008年までに既存する建物面積を算定して用いた。また、本研究では平均的建物種別比率を使って木造と非木造それぞれに対してCO₂負荷を予測した。非木造に関してはRC造（SRC造を含む）とS造に区別し、その比率を昭和56年から平成5年までの建築統計年報から求め、それぞれ47%（RC+SRC）、53%（S）とした。また、RC造では2階から13階、S造では1階から5階までを対象とし、その階数ごとの比率を平成15年建築統計年報^[7-17]に基づき全国の建物階数別延床面積の比率と同じとした。対象とした階数の建物の割合は全建物に対してRC造では95%、S造では93%を占めていた。木造建物ではすべてが3階以下に限られ、その8割程度は2階建てのため、全建物に対してモデルが適用できるとみなした。なお、非線形応答解析モデルにないS造1・2階の被害率はS造の平均被害率を代用した。観測点がなかった市町村については、隣接している市町村で大破以上の被害が生じるとされた場合には、当該市町村の建物も隣接している市町村の平均被害率の50%の被害を受けるものと仮定した。以上の準備をもとにCO₂負荷の評価は以下の式で求めた。

$$\text{木造 CO}_2 \text{ 負荷} = (\text{被害発生時の倍率}) \times (\text{床面積当り新築時 CO}_2 \text{ 排出量}) \times (\text{木造建物延床面積}) \times (\text{木造被害率}) \quad (7.2.1)$$

$$\begin{aligned} \text{非木造 CO}_2 \text{ 負荷} = & (\text{被害発生時の倍率}) \times (\text{床面積当り新築時 CO}_2 \text{ 排出量}) \times \{ \text{非木造建物の延床面積} \\ & \times [(0.47 \times \text{RC 造階毎の被害率}(2-13\text{f}) \times \text{その階の建物比率}) \\ & + (0.53 \times \text{S 造階毎の被害率}(1-5\text{F}) \times \text{その階の建物比率})] \} \end{aligned} \quad (7.2.2)$$

上記の式で必要な係数を表7-2および表7-3に示す。ここで建設現場の施行過程に伴うCO₂排出量は37.4kg-CO₂/m²として考慮した。

表 7-2 建築物の床面積あたりの新築時CO₂排出量³⁾

構造種類	木造建物	非木造建物
床面積CO ₂ 排出量	434.2(kg/m ²)	666.0(kg/m ²)

表 7-3 被害発生時と新築時のCO₂排出量比^[7-4]

建物の構造	木造	SRC造	RC造	鉄骨造
倒壊	1.05	1.12	1.12	1.07
中破	0.05	0.05	0.05	0.05

7.3 中・大破建物による廃棄物量の算定手法

災害廃棄物では被害を受ける建築物を修復や建て替えに伴う廃棄物と破壊された生活用品及び工場製品などから出る一般ゴミが考えられる。しかし、本研究の中破・大破被害率データから一般ゴミ量を推定するのは難しい。一方、兵庫県南部地震による倒壊家屋等の廃棄物量は1千数百万tと見込まれたが、倒壊家屋等の解体撤去した木造・RC造・鉄骨造建物の面積及び木造家屋とRC造ビル・マンション・市公共施設の廃棄物量を公開されている^[7-19]。ただし、その木造家屋の廃棄物にはRC造ビル・マンション・市公共施設など非木造構造による木質系廃棄物も含まれている。一方、表7-5で示している山口ら^[7-9]の調査によると非木造建物に含まれる木材は非常に少ないことから、そのRC造ビル・マンション・市公共施設の廃棄物量と木造家屋の廃棄物量をRC造（SRC造含む）・鉄骨造と木造建物の面積で割り、災害廃棄物の面積当りの重量単位を推定した^[7-20]。その結果を表7-6に示したが、木造建物と非木造建物の災害廃棄物の面積単位は0.86(t/m²)と1.93(t/m²)になり、山口らによる構造別平均面積重量単位に比べ、それぞれ25%と3%大きくなっている。これは、地震災害で生じた倒壊家屋の廃棄物は、建物躯体以外にその建物の中にあつた生活用品などの一般ゴミが含まれていたためと推定される。すなわち木造建物では25%の、非木造建物では3%の一般ゴミが含まれていたことになる。

以上本研究では表7-6のように得られた災害廃棄物の面積当りの重量単位に中破と大破以上になる建物の面積を掛けて木造建物と非木造建物の災害廃棄物を推定することとした。なお中破建物の廃棄物については中破建物によるCO₂排出量の計算と同じように0.05を掛けることにした。

表 7-5 構造別資材重量比率の平均^[7-9]

	木造	SRC造	RC造	鉄骨造
コンクリート類	83%	92%	94%	88%
木材	15%	1%	1%	1%
金属類	2%	7%	5%	11%
構造別平均単位 面積重量(t/m ²)	0.69	2.15	2.24	1.21

表 7-6 災害廃棄物量^[7-20]及び推定した災害廃棄物の面積重量

解体撤去状況	木造 (軽量鉄骨含む)		RC造 (SRC含む)		鉄骨造 (その他の工作物含む)	
	棟数(棟)	面積(m ²)	棟数(棟)	面積(m ²)	棟数(棟)	面積(m ²)
合計	57,694	5,345,339	1,839	1,343,605	1,859	435,768
災害廃棄物の搬入・処理処分実績(t)	木造家屋 4598000		コンクリート造ビル、マンション、市公共施設 3437000			
推定した災害廃棄物の 面積重量(t/m ²)	0.86		1.93			
推定災害面積重量/山 口らによる面積重量	1.25		1.03			

7.4 想定南海トラフ沿いの巨大地震における CO₂ 環境負荷と廃棄物量の算定

前節で述べた計算手法を用いて想定南海地震で木造建物と非木造建物が中破した場合は修復に、大破以上の被害を受けた場合はその構造躯体の解体、運搬、及び建替に伴う CO₂ 環境負荷と廃棄物量を算定した。建物の被害率分布に対応して震源域から近い海岸地域に多く分布しているが、特に高知市や徳島市など地方中心都市に集中していることが読み取れる。これは建物被害率が高くかつ建物棟数・床面積が大きい地域で総 CO₂ 負荷や廃棄物量が大きくなるからである。図 7-1 は CO₂ 負荷を県ごとに集計したものを示しており、東南海地震が発生した場合には愛知・三重・和歌山の三県で排出される量が全体の 80% 以上を占めることが分かる。従ってこの三県こそ重点的に対策を行う必要がある地域であることが指摘される。図 7-2 には対象建物別の総床面積と CO₂ 負荷量を示した。図 7-3 は連動型地震を例として、対象建物別の総床面積と CO₂ 負荷量・廃棄物量を示したが、木造建物の床面積は非木造建物とほぼ同程度であるにもかかわらず、CO₂ 負荷量・廃棄物量は非木造建物を上回っている。また、旧耐震非木造建物の床面積が新耐震非木造建物の方よりかなり少ないにもかかわらず CO₂ 負荷量・廃棄物量は 2 倍近く排出されることから、新耐震設計法によって耐震性能を向上させたことが地震災害によって排出される環境負荷の減少に大きく貢献できていると言えよう。

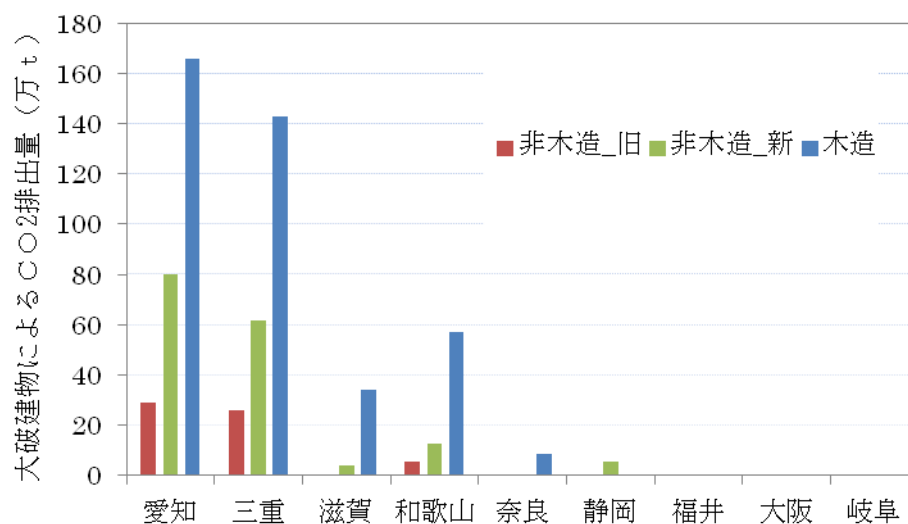


図 7-1 CO₂ 負荷を県ごとに集計したものを示す（東南海地震ケース）

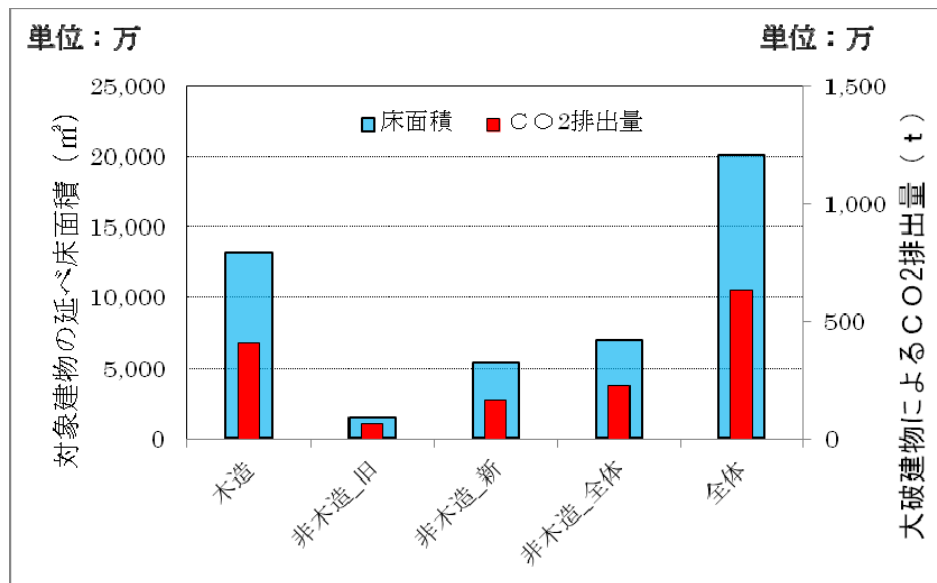


図 7-2 対象建物の床面積と大破構造別による CO₂ 負荷量（東南海地震ケース）

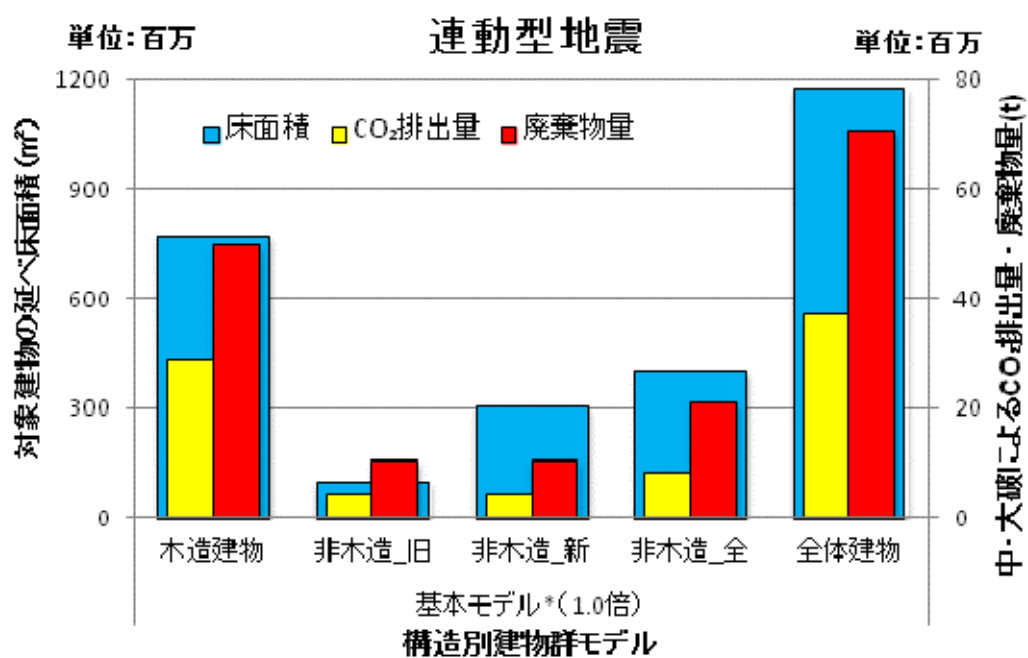


図 7-3 対象建物の床面積と構造別 CO₂ 負荷量・廃棄物量（連動型ケース）

7.5 本章のまとめ

本章では、市町村別の建物棟数の推計値と上記の予測被害率から、大破・倒壊した建物および中破建物によるCO₂負荷量・廃棄物量を予測したところ、東南海地震の場合は、全体の80%が高知県・徳島県・和歌山県に集中しており、床面積の多い木造建物による総環境負荷が非木造建物のそれより多くなることが分かった。連動型地震の場合は、全被害建物から生じるCO₂負荷量は約3701万トンで、1990年のCO₂排出量の約29%、京都議定書に設定した5年間の削減目標値の50%に相当する。また、生じる廃棄物量は約7067万トンで、1990年の全国産業廃棄物の約18%に相当し、巨大地震による環境負荷がかなり大きいことが指摘できる。

以上のことから、巨大地震の発生が切迫している地域では、人口密度が高く、かつ震源に近く地盤が軟弱な沖積地盤となっている市町村を中心に、大破以上になりやすい建物を対象とした耐震補強推進対策を実施することが、安全性の向上のみならずその環境負荷リスクを低減させるのに効果的であるといえる。

第7章の参考文献

- [7-1] 日本建築学会：活動レポート，気候温暖化への建築分野での対応，日本建築雑誌，Vol. 113, No. 1417, pp91-92, 1998. 1.
- [7-2] 日本建築学会：建物のLCA指針，1999. 11.
- [7-3] 日本建築学会：地球環境委員会，2003年7月公開，
<http://news-sv.aij.or.jp/tkankyo/s0/news.htm>
- [7-4] 構造安全研究会：(<http://SSWEB.K.U-TOKYO.AC.JP/>)，2006.
- [7-5] 伊香賀俊治，村上周三，加藤信介，白石靖幸：我が国の建築関連CO₂排出量の2050年までの予測，日本建築学会計画系論文集，第535号，pp53-58，2000. 9.
- [7-6] 萩島理，谷本潤，片山忠久，熊本健：地域特性を考慮した建築解体廃棄物の発生量の将来予測に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第562号，pp75-82，2002. 12.
- [7-7] 漆崎昇，水野稔，下山吉之，酒井寛二，森正義：建築物の長寿命化におけるライフサイクル廃棄物と二酸化炭素排出量に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第563号，pp93-100，2003. 1.
- [7-8] 山田哲，黒川礼子，會澤貴浩，岩田衛：廃棄物重量とLCCO₂量に着目した鉄骨造建物における環境負荷の評価，日本建築学会構造系論文集，第554号，pp131-137，2002. 4.
- [7-9] 山口義弘，他三名：解体工事に伴う建設資材廃棄物の発生量予測，日本建築学会計画系論文集，第610号，pp49-56，2006. 12.
- [7-10] 国土交通省住宅局住宅生産課：建築づくりの新しい概念，建築物総合環境性能評価（CASBEE）について，建設マネジメント技術，2004. 2.
- [7-11] 包 那仁満都拉・川瀬 博，想定南海地震の予測被害率から推定される環境負荷とそれに対する耐震施策の与える影響，日本建築学会総合論文誌，123，1572，87-92，2008.
- [7-12] 川瀬 博・那仁満都拉，時系列的な建物被害床面積予測とその環境負荷の評価－巨大地震被害予測スキームを用いた時系列被害予測とその環境負荷評価への応用に関する研究 その2－，日本建築学会構造系論文集，Vol. 74, No. 645，1957-1965，2009.
- [7-13] 神田順，他：既存建物の標準的構造性能評価法の開発，2002. 6. <http://ssweb.k.u-tokyo.ac.jp/>
- [7-14] 勅使川原正臣，北川良和，川瀬博，宇佐美祐人：兵庫県南部地震における被災地域での強震動特性と建築物の被害解析，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，第1分冊，315-320，1998.
- [7-15] 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，建設省建築研究所，1996
- [7-16] 緑川光正，長谷川隆，向井昭義，西山功，福田俊文，山内泰之：1995年兵庫県南部地震における特定地域の鉄骨造建物被害調査，日本建築学会構造系論文集，第493号，pp115-120，1997. 3
- [7-17] 総務省統計局：<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/index.htm>
- [7-18] 建設省建設経済局調査情報課：建築統計年報，平成15年度計・5年計，平成16年度版.
- [7-19] 神戸市震災資料室：災害廃棄物処理処分，<http://www.city.kobe.jp/cityoffice/15/020/quake/>.
- [7-20] 小松幸夫，加藤裕久，吉田倬郎，野城智也：わが国における各種住宅の寿命分布に関する調査報告，日本建築学会計画系論文報告集，第439号，pp. 101-110，1992. 9.

第 8 章 建物耐震性能向上による被害低減度予測

8.1 はじめに

8.2 耐震設計の問題

8.3 耐震性能向上による推定被害率の変化

8.4 耐震性能向上による環境負荷の変化

8.5 本章のまとめ

第 8 章の参考文献

8.1 はじめに

建物の安全性向上対策として、建物耐力を増加させる耐震補強策を施すことと耐震設計レベルを改訂することが考えられる。平成7年兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）では、昭和56年（1981年）以前の旧耐震設計基準で建てられた築15年を超える建物に大きな被害が集中したことが指摘されている^[8-1]。

旧耐震設計基準で建てられた建物は現時点で既に築30年以上となっており、次の南海トラフでの大地震（東南海・南海地震）が起こるまでの間に建築寿命を迎えていることから、次の大地震では新耐震設計基準で建てられた建物が被害の中心になると予測される。また、耐震設計レベルを改訂して必要耐力を引き上げたとしても、耐震基準の審査は計画・設計段階に行われるため、建設された後の実建物が持つ保有耐力の必要耐力に対する過不足が担保されていないという課題が残される^[8-2]。

さらに、今後の持続的な社会における防災の観点では、人口減少などから新築される建物が減少することが容易に予想され、既存ストックの建物の耐力をどう判断するか、また現行の基準で十分な安全性を確保できるかを検討する必要がある。十分な安全性を確保できない場合、耐震性能を向上させる必要があるが、引き上げるによりコストが増えたとともに、施工時の環境負荷も増加する。特に環境負荷の総量を考えれば耐震性能を制限なく増加させることは適切とは言えない。

本章ではこれらのことを踏まえ、耐震性能を向上させた時の被害率の低減効果と同時に耐震性能を向上させることによる環境負荷のうち特にCO₂の増加率に着目し、耐震性能を向上させることによる影響について検討した。

8.2 耐震補強スキームの問題点

ここでは、ターゲットとする地震をその発生が危惧されている東南海（東海セグメントを含む）地震・南海地震に絞って耐震補強の必要性・緊急性について考察する。現在の住宅の平均使用年数は精々25年から30年である。事務所建築であってもその平均寿命は高々40年程度で、耐用年数まで使用される建物はむしろ例外的存在である。一方、地震調査研究推進本部の長期評価では、今後30年以内に東南海地震・南海地震が発生する確率は50%～60%とされているが、海溝性地震の場合には平均発生間隔が短いので、現時点での瞬間確率と30年後の瞬間確率では30年後の方が有意に高くなる。言い換えると現時点での瞬間確率は上記の期間確率を平均換算したものよりもはるかに低い確率となる。ちなみに過去のこの海域での地震発生間隔は最も短くて90年であり、それを考慮すると1944年（昭和）東南海地震から90年経過する2034年までは地震発生はないと想定することには一定の合理性がある^[8-1]。

その前提で考えた場合、例えば現在すでに建設後30年間が経過し、既存不適格で耐震診断の結果耐震性が不十分であると判定される建物を、耐震性が不足しており巨大地震が30年以内に発生する確率が50%以上あるということを理由に現時点で直ちに耐震補強する積極的理由はほとんどないといわざるを得ない。いずれにしても東南海・南海地震が発生するところには建て替えられている可能性が高いからである。

また、耐震補強・耐震改修および耐震性の不足を理由とした建て替えが進まない理由の一つとして、一般市民におけるその必要性に対する根強い懷疑があると考えられる。これらの行為はオーナーにとってコストと資源と時間を消費する行為であって、納得の行く説明がなければ踏み切ることができない。耐震補強やそれを理由にした建て替えが真に必要なものなのかどうかを的確に判定する方法を確立することがそれを促進する一番の早道である。

建物の安全性向上対策として、建物耐力を増加させる耐震補強策を施すことが考えられる。本研究では、第7章までに用いた長戸・川瀬モデル^[8-4, 8-5]（モデル_1.00 と記し、以下同じ）の耐力を1.25倍（モデル_1.25）と1.50倍（モデル_1.50）に補強したと仮定し、想定東南海地震および3連動型地震による被害率を第6章と同様の手法により評価した。その結果を表8-1 および表8-2 に示すが、建物耐力を1.25倍にした場合は建物被害率が全てのモデルの種類を合わせて、東南海地震の場合は平均27%減少し、建物耐力を1.50倍にした場合には建物被害率は平均47%減少することが分かった。3連動型地震の場合は建物耐力を1.25倍にした場合には建物被害率は平均32%減少し、建物耐力を1.50倍にした場合には建物被害率は平均51%減少することが分かった。その効果は旧耐震建物より新耐震建物の方が大きく、鉄骨造よりRC造建物の方が大きく、木造建物より非木造建物の方が大きいことが分かった。

表 8-1 建物耐力の増加による大破被害率の変化 (想定東南海)

モデルの種類		木造 2F	RC造 3F		RC造 6F		RC造 9F		RC造 12F		S造 3F		S造 4F		S造 5F		
旧・新建物(1981)		-	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	
被害が出る点(136点中)		34	31	18	18	9	36	19	28	23	52	49	45	32	24	12	
平均被害率(%) モデル 1.00		19.5	13.5	9.8	15.7	18.6	18.4	11.8	16.2	12.1	30.0	28.8	25.6	21.6	20.9	23.1	
平均被害率(%) モデル 1.25		15.2	7.7	7.4	14.7	8.0	13.2	11.2	11.5	7.3	23.1	20.7	19.9	15.4	15.9	18.0	
被害率の減少率 (%)	旧・新耐震建物 階毎	22	43	24	6	57	28	5	29	40	23	28	22	29	24	22	
	旧耐震建物 構造毎	22	27									23					
	新耐震建物 構造毎	-	32									26					
	旧耐震建物	-	25														
	新耐震建物	-	29														
	全体の建物	27															
モデルの種類		木造 2F	RC造 3F		RC造 6F		RC造 9F		RC造 12F		S造 3F		S造 4F		S造 5F		
旧・新建物(1981)		-	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	
平均被害率(%) モデル 1.00		19.5	13.5	9.8	15.7	18.6	18.4	11.8	16.2	12.1	30.0	28.8	25.6	21.6	20.9	23.1	
平均被害率(%) モデル 1.50		14.2	7.9	1.8	12.1	7.7	9.3	6.5	9.1	4.9	19.0	17.7	15.1	12.5	9.1	9.9	
被害率の減少率 (%)	旧・新耐震建物 階毎	28	42	81	23	59	49	45	44	60	37	38	41	42	57	57	
	旧耐震建物 構造毎	28	40									45					
	新耐震建物 構造毎	-	61									46					
	旧耐震建物	-	42														
	新耐震建物	-	55														
	全体の建物	47															

表 8-2 建物耐力の増加による大破被害率の変化（3連動型）

モデルの種類		木造 2F		RC造 3F		RC造 6F		RC造 9F		RC造 12F		S造 3F		S造 4F		S造 5F		
旧・新建物(1981)		-		OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	
被害が出る点(333点中)		82	74	47	47	25	89	45	48	60	120	119	107	74	61	34		
平均被害率(%) モデル 1.00		24.3	12.4	9.1	17.9	13.4	17.9	13.9	14.0	19.3	26.7	28.3	28.7	24.3	22.1	20.3		
平均被害率(%) モデル 1.25		18.6	9.0	6.1	10.1	7.4	13.6	8.5	7.9	12.3	19.5	21.7	21.9	18.3	16.0	12.5		
被害率の減少率 (%)	旧・新耐震建物 階毎	23	28	33	43	44	24	39	43	36	27	23	24	25	28	38		
	旧耐震建物 構造毎	23	35									26						
	新耐震建物 構造毎	-	38									29						
	旧耐震建物	-	31															
	新耐震建物	-	34															
	全体の建物		32															
モデルの種類		木造 2F		RC造 3F		RC造 6F		RC造 9F		RC造 12F		S造 3F		S造 4F		S造 5F		
旧・新建物(1981)		-		OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	OLD	NEW	
平均被害率(%) モデル 1.00		24.3	12.4	9.1	17.9	13.4	17.9	13.9	14.0	19.3	26.7	28.3	28.7	24.3	22.1	20.3		
平均被害率(%) モデル 1.50		15.6	6.1	2.3	5.3	4.4	10.8	6.6	7.2	8.2	15.8	17.4	16.5	13.1	12.0	10.6		
被害率の減少率 (%)	旧・新耐震建物 階毎	36	51	75	71	67	40	52	49	57	41	39	43	46	46	48		
	旧耐震建物 構造毎	36	52									43						
	新耐震建物 構造毎	-	63									44						
	旧耐震建物	-	48															
	新耐震建物	-	55															
	全体の建物		51															

8.4 耐震性能向上による環境負荷の変化

前節で評価した建物耐力の増加による大破被害率の変化に基づき、建物の耐力を増大させた場合の環境負荷評価を行なう。はじめに必要な耐震コストを評価する。

旧耐震非木造建物の場合には耐震補強を行なうと仮定し、前川の 58 棟低層 RC 造建物の面積、補強前 I_s 値、耐震補強費用係数（万円/㎡・ I_s ）を用いて、さらにそれぞれの建物新築費用（購入者単価²⁾：17.87 万円/㎡）を算定し、補強前 I_s 値を 1.25 倍、1.50 倍にするのに必要な補強費の比率を求めた。新耐震非木造建物の場合は、設計荷重の増加に対応してコストが増加すると考え、神田^[8-6]らのイニシャルコストの算定例（コスト比=0.48045 C_o +0.90693）から求めた。また、神田らの結果では、建物構造種類（RC・S・SRC）や建物高さが違ってもそのコスト比の変化が小さいことから、木造建物の耐力増加によるコスト増加比も非木造建物と同じとする。ここで全コストに占める躯体コストの比は神田^[8-6]らに従って 30%と仮定し、面積当りの重量は山口^[8-7]らの結果を用いた。

得られた耐震増加コスト比と 1995 年産業連関表^[8-8]から読み取って算定した CO_2 と廃棄物の単価を表 8-3 に示す。その耐震コスト比を中破以上の被害が出る地域における全建物の床面積に掛けて耐力増加による初期環境負荷を算定した。それぞれ図 8-1 と図 8-2 に示した。また、基本モデルと同じ手法で計算されたモデル_1.25 とモデル_1.50 の環境負荷にも耐震コスト比をかけて被害建物の環境負荷増分も算定した。それらの収支を考慮した 3 連動型の結果を表 8-5 に示した。 CO_2 排出量は、建物耐力を 1.25 倍にした場合、大破する木造と旧耐震非木造建物に係わる排出量をそれぞれ 5%、13%減少させる効果があり、さらに建物耐力を 1.50 倍にした場合も旧耐震非木造建物だけは 6%減となり、総計でも効果が出る事が分かる。しかし、それ以外の中破建物寄与分や新耐震非木造建物については耐力を増大させると逆に総 CO_2 排出量が増加してしまうことが分かる。一方廃棄物量に関しては、建物耐力を 1.25 倍、1.50 倍にするとそれぞれ 22%、37%減少する。廃棄物量の減少効果が CO_2 より大きいのは、廃棄物の計算ではリサイクルなども考えられるので、耐力を増加させた全建物に対する必要物量を計上していないためである。一方、 CO_2 排出量の計算では全建物の補強に必要な躯体物量による CO_2 も考慮されている。その結果から、比較的限定された地方都市域における大破建物棟数を減少させることが全体の環境負荷リスクの大きな低減に直結するので、巨大地震の震源域に近い都市部において大破するリスクの高い建物を中心とした対策を行うことが効率的施策であると言える。

表 8-3 建物耐力増加によるコスト比及び単価

構造種類_建築年代	耐震コスト_耐力1.25		耐震コスト_耐力1.50		CO_2 単価 (万円/t)	廃棄物単価 (万円/t)
	CO_2 排出量	廃棄物	CO_2 排出量	廃棄物		
非木造建物_旧耐震	2.2%	7.4%	4.5%	14.9%	27.54	2.58
非木造建物_新耐震	2.7%	9.0%	5.1%	17.0%		
木造建物_区別なし	2.5%	8.2%	4.8%	15.9%	38.42	

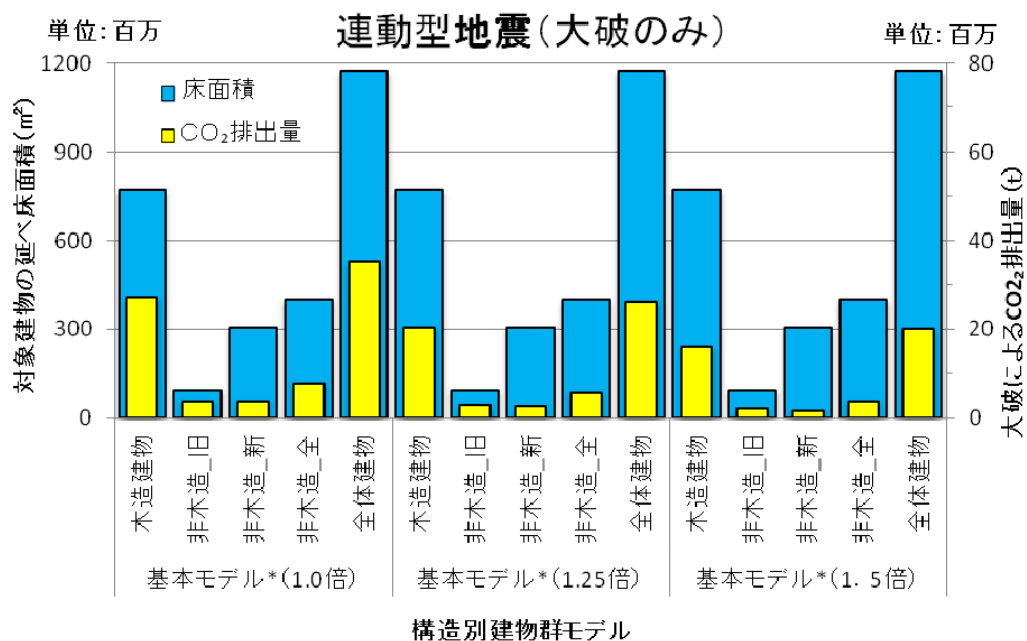


図 8-1 建物耐力の増加による CO₂排出量の変化 (3 連動型)

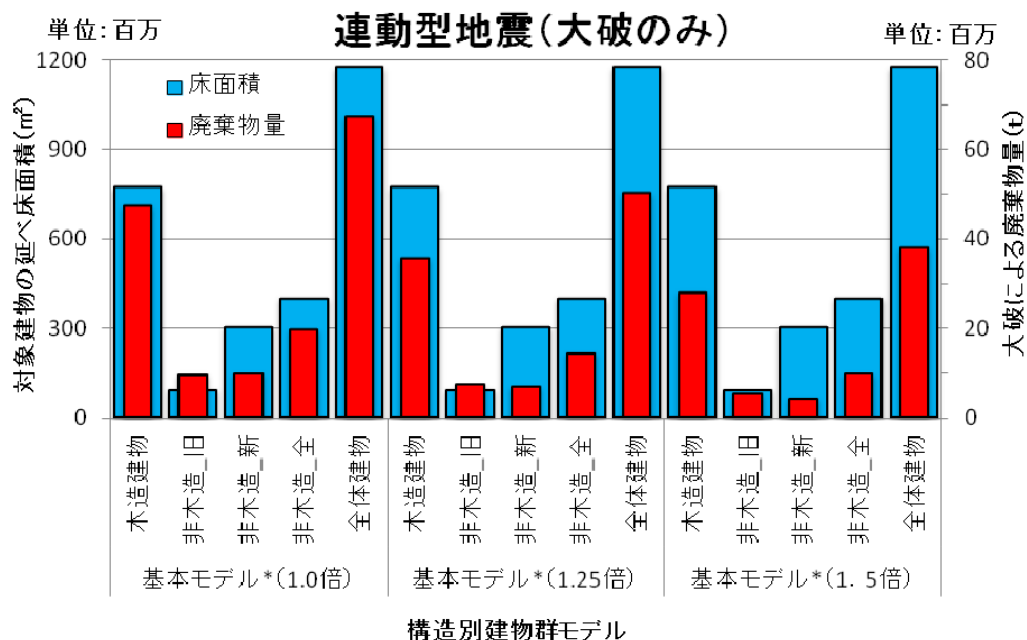


図 8-2 建物耐力の増加による廃棄物量の変化 (3 連動型)

表 8-4 建物耐力の増加による環境負荷の変化率（想定東南海）

建物モデル	構造種類	CO ₂ 排出量の減少率			廃棄物量の減少率		
		大破建物	中破建物	中・大破建物	大破建物	中破建物	中・大破建物
モデル 耐力*1.50	木造 全体	5%	-1015%	6%	31%	31%	31%
	非木造 旧耐震	6%	-904%	8%	43%	42%	43%
	非木造 新耐震	-120%	-3854%	-112%	45%	35%	45%
	非木造 全体	-40%	-1988%	-36%	44%	40%	44%
	全体建物	-12%	-1483%	-10%	37%	36%	37%
モデル 耐力*1.25	木造 全体	5%	-522%	5%	17%	17%	17%
	非木造 旧耐震	13%	-460%	13%	31%	30%	31%
	非木造 新耐震	-66%	-2068%	-63%	20%	23%	20%
	非木造 全体	-16%	-1051%	-15%	27%	28%	27%
	全体建物	-4%	-777%	-3%	22%	23%	22%
基本モデル 耐力*1.00	構造種類	CO ₂ 排出量(百万t)			廃棄物量(百万t)		
	木造 全体	27.3	1.4	28.7	47.4	2.4	49.8
	非木造 旧耐震	4.0	0.2	4.2	9.8	0.5	10.3
	非木造 新耐震	4.0	0.2	4.2	10.0	0.5	10.5
	非木造 全体	8.0	0.4	8.4	19.9	1.0	20.9
	全体建物	35.3	1.7	37.0	67.3	3.4	70.7
	構造種類	CO ₂ の等価費用(百万円)			廃棄物の等価費用(百万円)		
	木造 全体	1,048	52	1,101	122	6	129
	非木造 旧耐震	111	5	115	25	1	27
	非木造 新耐震	110	5	115	26	1	27
	非木造 全体	220	10	230	51	3	54
	全体建物	972	48	1,019	174	9	182

表 8-5 建物耐力の増加による環境負荷の変化率（3連動型）

建物モデル	構造種類	CO ₂ 排出量の減少率			廃棄物量の減少率		
		大破建物	中破建物	中・大破建物	大破建物	中破建物	中・大破建物
モデル 耐力*1.50	木造 全体	5%	-1015%	6%	31%	31%	31%
	非木造 旧耐震	6%	-904%	8%	43%	42%	43%
	非木造 新耐震	-120%	-3854%	-112%	45%	35%	45%
	非木造 全体	-40%	-1988%	-36%	44%	40%	44%
	全体建物	-12%	-1483%	-10%	37%	36%	37%
モデル 耐力*1.25	木造 全体	5%	-522%	5%	17%	17%	17%
	非木造 旧耐震	13%	-460%	13%	31%	30%	31%
	非木造 新耐震	-66%	-2068%	-63%	20%	23%	20%
	非木造 全体	-16%	-1051%	-15%	27%	28%	27%
	全体建物	-4%	-777%	-3%	22%	23%	22%
基本モデル 耐力*1.00	構造種類	CO ₂ 排出量(百万t)			廃棄物量(百万t)		
	木造 全体	27.3	1.4	28.7	47.4	2.4	49.8
	非木造 旧耐震	4.0	0.2	4.2	9.8	0.5	10.3
	非木造 新耐震	4.0	0.2	4.2	10.0	0.5	10.5
	非木造 全体	8.0	0.4	8.4	19.9	1.0	20.9
	全体建物	35.3	1.7	37.0	67.3	3.4	70.7
	構造種類	CO ₂ の等価費用(百万円)			廃棄物の等価費用(百万円)		
	木造 全体	1,048	52	1,101	122	6	129
	非木造 旧耐震	111	5	115	25	1	27
	非木造 新耐震	110	5	115	26	1	27
	非木造 全体	220	10	230	51	3	54
	全体建物	972	48	1,019	174	9	182

8.5 本章のまとめ

本章では、建物耐力を 1.25 倍、1.50 倍に増大させた場合、東南海地震の場合は被害率も廃棄物量もそれぞれ約 27、47%および約 22、37%減少、連動型地震の場合は被害率も廃棄物量もそれぞれ約 32、51%および約 25、43%減少するが、CO₂ 排出量は大破する木造建物と旧耐震非木造建物に限っては総計でも若干減少するものの、新耐震建物や中破建物では逆に増大することが分かった。

以上のことから、巨大地震の発生が切迫している地域では、人口密度が高く、かつ震源に近い軟弱な沖積地盤となっている市町村を中心に、大破以上になりやすい建物を対象とした耐震補強推進対策を実施することが、安全性の向上のみならずその環境負荷リスクを低減させるのに効果的であるといえる。

第 8 章の参考文献

- [8-1] 建設省建築研究所：平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，建設省建築研究所，1996.
- [8-2] 川瀬博：福岡県西方沖地震を受けて考える，実耐力、強震動特性、建物寿命と耐震補強，建築雑誌，121(1553)，18-19，2006. 11.
- [8-3] 川瀬博：地震防災の中長期的課程と戦略―都市空間安全制御の観点から―，京都大学防災研究所年報，第 56 号 A 平成 25 年 6 月.
- [8-4] 長戸健一郎，川瀬博：建物被害データと再現強震動による RC 造構造物群の被害予測モデル，日本建築学会構造系論文集，第 544 号，31-37，2001. 6.
- [8-5] 長戸健一郎，川瀬博：鉄骨造建物群の被害予測モデルの構築，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，101-106，2002. 9.
- [8-6] 神田順，平川倫生：限界状態設計における設計荷重のための最適目標信頼性指標，日本建築学会構造系論文集，第 523 号，39-46，1999. 9
- [8-7] 山口義弘，他三名：解体工事に伴う建設資材廃棄物の発生量予測，日本建築学会計画系論文集，第 610 号，49-56，2006. 12.
- [8-8] 日本建築学会：建物の LCA 指針，1999. 11.

第 9 章 結論

9.1 本論文のまとめ

9.2 今後の課題及び展望

9.1 本論文のまとめ

本研究では、主に東海・東南海・南海地震の単独および連動発生を想定して、建築物の安全性を脅かす強震動を最新の知見に基づき評価するとともに、その震源域における建築物の集合体である都市空間の耐震安全性を調べ、地震災害の軽減を効果的に図る方法を提案するための一連の手法を開発することを目的とした検討を行った。まず、大地震による被害、特に人的被害を軽減するためには、住宅の耐震化が重要であるが、実際にはなかなか進んでいないのが現状である。その理由の一つとしては、耐震改修工事の効果に対する信頼性の欠如、情報不足が挙げられる。そこで、二つの構造種別の異なる建物を例として耐震補強工事の有効性について検討を行った。次に、地震による構造物の大破、倒壊といった大被害は、構造物に作用する揺れ方（地震動）と構造物が耐えられる力（耐震性能）との相対関係によって決まる。従って巨大海溝型地震の典型的な例である 2011 年東北地方太平洋沖地震の強震動および被害を再現することによって強震動予測手法および被害予測手法の検証を行うことが重要である。ここでは東北地方太平洋沖地震で得られた本震の強震観測記録を分析し、その構造物破壊能を構造物群の非線形応答解析によって被害率を予測する長戸・川瀬建物群モデル（2000, 2001）で評価し、非常に大きな加速度を記録したにも関わらず、揺れによる大きな建物被害が比較的軽微なレベルにとどまった理由を考察した。さらに長周期（10 秒）まで有効な統計的グリーン関数（包・川瀬, 2007）と 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル（佐藤, 2012）を用いて本震の強震波形を再現し、前述の方法で構造物破壊能を求め、実際に観測された地震動による推定建物被害率や建物調査を行った観測点の観測被害（境, 2011）との対応関係を比較した。最後に、2011 年東北地方太平洋沖地震で得られた知見を踏まえて、南海トラフ沿いの海溝型巨大地震である東海・東南海地震と南海地震の単独および連動発生時の強震動を長周期まで有効な統計的グリーン関数を用いた波形合成法により定量的に予測し、それを非線形応答解析モデル（長戸・川瀬建物群モデル, 2000, 2001）に入力して、震源域における木造建物、中低層 RC 造建物、低層鉄骨建物の被害予測を実施した。また、原単位および建物ストックの統計値情報を用いてその地震被害がもたらす環境負荷を計算した。その際に、もし建物の設計耐力を政策的に上昇させていった場合、それが建物の被害総量や環境負荷にどのくらい影響するかを評価した。さらに震源域の建物の被害総数から、死傷者数や帰宅困難者数、社会的影響度等を予測することも可能である。これら一連の予測は、その非線形応答を数値的に評価する「建物崩壊挙動シミュレータ」に基づいており、予測被害は建物の実耐震性能の関数となるので、地域の構造物群の耐震性能をどの程度向上させれば上記の構造物被害及び環境負荷をどの程度抑えられるかを定量的に評価することが可能である。即ち、耐震対策効果に見合った必要政策コスト評価が可能となる。

本研究では、不均質な破壊様式を持つ震源断層モデルを考慮して統計的グリーン関数法を用いて想定東南海地震と南海トラフ巨大地震による西日本における強震動を試算した。次に、統計的非線形建物被害予測モデルにこの想定南海地震の強震動を入力して、西日本における木造・RC 造・S 造建物の被害予測を行った。その結果、高知、徳島、和歌山など震源域を中心に、海岸地域と川沿いの沖積地盤地域などの比較的地盤が軟らかい場所で大破以上の建物被害が生じる可能性があることが分かった。また構造種類別でみると鉄骨造、木造、RC 造建物の順に被害率が小さくなることが分かった。少なくとも耐震補強など南海地震に向けた被害対策を立案する上では、南海地震震源近傍か地盤が軟弱であるかどちらかを満たす地域を重点的に対象とすべきであることが指摘できる。

さらに、市町村別の建物棟数の推計値と上記の予測被害率から、大破・倒壊した建物および中破建物によるCO₂負荷量・廃棄物量を予測したところ、東南海地震地震の場合は、全体の80%が高知県・徳島県・和歌山県に集中しており、床面積の多い木造建物による総環境負荷が非木造建物のそれより多くなることが分かった。連動型地震地震の場合は、全被害建物から生じるCO₂負荷量は約3701万トンで、1990年のCO₂排出量の約29%、京都議定書に設定した5年間の削減目標値の50%に相当する。また生じる廃棄物量は約7067万トンで、1990年の全国産業廃棄物の約18%に相当し、巨大地震による環境負荷がかなり大きいことが指摘できる。最後に、建物耐力を1.25倍、1.50倍に増大させた場合、東南海地震地震の場合は、被害率も廃棄物量もそれぞれ約22、27%および約28、47%減少し、連動型地震地震の場合は、被害率も廃棄物量もそれぞれ約23、32%および約36、51%減少すが、CO₂排出量は大破する木造建物と旧耐震非木造建物に限っては総計でも若干減少するものの、新耐震建物や中破建物では逆に増大することが分かった。以上のことから、巨大地震の発生が切迫している地域では、人口密度が高く、かつ震源に近い軟弱な沖積地盤となっている市町村を中心に、大破以上になりやすい建物を対象とした耐震補強推進対策を実施することが、安全性の向上のみならずその環境負荷リスクを低減させるのに効果的であるといえる。

9.2 今後の課題及び展望

南海トラフの巨大地震における被害想定に当たっては、想定強震動を特性化震源モデルと長周期（10秒）まで有効な統計的グリーン関数法によって予測し、中低造建物の非線形応答解析モデルの解析被害率推算による境負荷等の被害想定を定量的推計結果をとりまとめたが、特に近い将来発生するであろう想定海溝型巨大地震における津波による被害、液状化による建物被害についても定量的に想定する必要がある。また、その震源域における超高層建物、免震構造物、石油タンク等の長周期構造物の建物被害について定量的に想定する必要がある。

西南日本地域では、過去の記録から、被害地震の多くが南海トラフ沿いで100～150年間隔で繰り返し発生しているM8クラスの巨大な海溝型地震であるが、その発生前後には内陸地殻内地震が多く発生することが知られている。西南日本における内陸地殻内地震である平成7年兵庫県南部地震（ $M_{\text{JMA}}7.3$ ）をきっかけに地震活動が活発化したと考えられており、次の南海トラフ沿いでの地震が発生するまでの間に被害を及ぼす地殻内地震が多く発生することが危惧される。このため、本研究と同様な検討を内陸地殻内地震についても行う必要がある。

発表論文一覧

論文

- [1] 宝音図, 川瀬博, 那仁満都拉: 地域別の建物振動特性を考慮した被害予測モデル構築手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 74, No. 642, pp. 1433-1441, 2009. 8. (査読あり)
- [2] 宝音図, 松島信一, 川瀬博: 観測データに基づいた耐震補強の有効性に関する実証的研究 ―京都大学宇治地区研究所本館を対象に―, 京都大学防災研究所年報, No. 53(B), pp. 15-22, 2010. 6.
- [3] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 観測データに基づいた耐震補強効果の定量的評価手法に関する研究―京都大学宇治地区研究所本館 を対象に―, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, CD-ROM, pp. 1646-1653, 2010. 11. (abstract 審査)
- [4] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 統計的グリーン関数による想定東南海地震の広帯域強震動予測と建物被害予測, 京都大学防災研究所年報, No. 54(B), pp. 13-21, 2011. 6.
- [5] Baoyintu, H. Kawase, and S. Matsushima :Broadband Strong Ground Motion Prediction for Hypothetical Tonankai Earthquake using Statistical Green's Functions Method and Subsequent Building Damage Evaluation, Proc. of 4th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Santa Barbara, America , August 23-26, No.3.13, 2011. 8. (abstract 審査)
- [6] Hayakawa, T., S. Toshimi, M. Oshima, H. Kawase, S. Matsushima, Baoyintu, F. Nagashima, and K. Nakano :Estimation of The Nonlinearity of the Surface Soil at Tsukidate during the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Proc. of 15th World Conf. Earthquake Eng., Lisbon, Portugal, 2012. 9. (abstract 審査)
- [7] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能, 東日本大震災 2 周年シンポジウム論文集, pp. 293-298, 2013. 3. (abstract 審査)
- [8] Naremandula, Baoyintu, Hiroshi Kawase, Mantegeer, Buren and Yuhai Bao. Broadband statistical Greens based on Observed Data by Strong Motion Networks and its Application to Tonankai Earthquake. The 4th International conference on Risk Analysis and Crisis Response (RACT2013). (EI), 277-283, 2013. 8. (査読あり)
- [9] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 2011 年東北地方太平洋沖地震による強震動と構造物破壊能, 日本地震工学会論文集, (投稿準備中) (査読あり)
- [10] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 統計的グリーン関数による想定東南海地震の広帯域強震動予測とその対応策に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, (投稿準備中) (査読あり)
- [11] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 観測データに基づいた耐震補強効果の定量的評価手法に関する研究, 京都大学宇治キャンパスにおける 2 棟の研究棟を対象に, 日本地震工学会論文集, (投稿準備中) (査読あり)

著書, 報告書等

- [1] 地震・地震動,
著者 川瀬博・松島信一・宝音図

2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報, 2 章(分担執筆), 日本建築学会, 2011. 7.

- [2] Earthquake and Ground Motions,
著者 Hiroshi Kawase, Shincihi Matsushima, and Baoyintu
AIJ Preliminary Reconnaissance Report of the 2011 Tohoku-Chiho Taiheiyō-Oki Earthquake,
Springer, 2012. 9.
- [3] 宝音図: シリーズ若手研究者の声, 留学生として勉強することが出来, 防災研究所ニューズレター
No. 67, 2013. 2.

概要

- [1] 宝音図, 川瀬博: 微動計測に基づく鉄骨造建物と RC 造建物の地域別振動特性, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp. 727-728, 2009. 8.
- [2] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 微動観測による構造物の耐震補強前後の振動特性とその耐震性評価—京都大学宇治キャンパス本館を対象に, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp. 1011-1012, 2010. 9.
- [3] 宝音図, 那仁満都拉, 川瀬博, 松島信一: 統計的グリーン関数法による想定東南海地震の広周期帯域の強震動予測, 日本地震学会秋季大会予稿集, B12-05, 2010. 10.
- [4] Kawase, H., Baoyintu, S. Matsushima, Strong Motion Characteristics of Tohoku, Japan Earthquake of March 11, 2011 in Terms of Damage Potential to Buildings with Different Construction Types, Seismological Society of America 2011 Annual Meeting, 2011. 4.
- [5] H. Kawase, S. Matsushima & B. Baoyintu: Strong Motion Characteristics of the Off Pacific Coast, Tohoku, Japan Earthquake of March 11, 2011 in Terms of the Damage Potential to Buildings, *IUGG General Assembly*, Melbourne, Australia, 27 June-8 July 2011.
- [6] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震における長戸・川瀬建物群モデルによる予測被害率, 日本地震学会秋季大会予稿集, B21-12, 2011. 10.
- [7] 早川崇, 大島光貴, 佐藤智美, 川瀬博, 松島信一, 宝音図, 長嶋史明, 仲野健一: アレー微動及びサイト特性を用いた K-NET 築館の表層地盤の推定, 日本地震工学会年次大会 2011 予稿集, pp. 444-445, 2011. 11.
- [8] 松島信一, 長嶋史明, 川瀬博, 早川崇, 大島光貴, 佐藤智美, 宝音図, 仲野健一: K-NET 築館周辺での東北地方太平洋沖地震の臨時余震観測, 日本地震工学会年次大会 2011 予稿集, pp. 446-447, 2011. 11.
- [9] 早川崇, 大島光貴, 佐藤智美, 川瀬博, 松島信一, 宝音図, 長嶋史明, 仲野健一: アレー微動及びサイト特性を用いた K-NET 築館の表層地盤および非線形特性の推定, 日本建築学会, シンポジウム「東日本大震災からの教訓、これからの新しい国づくり」, 2012. 3.
- [10] 宝音図, 川瀬博, 松島信一, 想定南海トラフ巨大地震による強震動予測に基づく西南日本における被害予測, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, pp. 271-272, 2013. 9.

口頭発表

- [1] 宝音図, 川瀬博: 常時微動観測による低層鉄骨造建物の振動特性の地域別比較, 平成 20 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D01, 2009. 2.

- [2] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 微動観測による構造物の耐震補強前後の振動特性とその耐震性評価—宇治キャンパス本館を対象に, 平成 21 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, E16, 2010. 2.
- [3] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 統計的グリーン関数法による想定東南海地震の広帯域強震動予測とそれによる建物被害予測, 平成 22 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, E21, 2011. 2.
- [4] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能, 平成 23 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D16, 2012. 2.
- [5] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 西南日本における想定南海トラフ巨大地震の強震動予測及びそれによる建物被害推定, 平成 24 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, D04, 2013. 2.
- [6] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された強震動とその構造物破壊能, 東日本大震災 2 周年シンポジウム, 東京, Or-15, 2013. 3.
- [7] 宝音図, 川瀬博, 松島信一: 観測地震動とその構造物破壊能—東北地方太平洋沖地震と中国汶川地震の比較, 平成 25 年度京都大学防災研究所研究発表講演会, A10, 2014. 2.

研究助成

- [1] 京都大学若手研究者スタートアップ研究費, 「西南日本海溝型巨大地震に対する定量的被害予測および発災インパクト予測に関する研究」, 研究代表 (2013 年度)
- [2] 京都大学総長裁量経費, 「西南日本における巨大地震による定量的被害予測とその対応策に関する研究」, 若手研究者の論文出版支援事業, (2013 年度)

謝 辞

本論文は、筆者が平成 20 年 10 月から今までの京都大学大学院工学研究科博士後期課程における約 5 年間の研究成果をまとめたものであります。この間、多くの方々からご指導、ご鞭撻、ご助言を賜りました。ここに記して深甚な感謝の意を表しますとともに、深く御礼申し上げます。

恩師である京都大学防災研究所教授 川瀬博先生には、建築学、地震学の基礎知識にも対して無知な筆者を平成 16 年 4 月に九州大学大学院人間環境学府の研究生として受け入れて頂き、それ以来現在に至るまで、生活面、勉学面などのすべてに対して大きな恩恵を受けながら、常に私のことを暖かく見守って下さいました。謹んで厚く御礼を申し上げます。9 年前は日本語がうまく伝えられない私に、先生の教授室をいきなり訪ねて、研究以外の家族のことや将来のことを相談することがあっても、先生は嫌な顔一つせずに懇切丁寧に相談に乗って下さり、いつも最後には的確な方向を示して下さいました。九州大学大学院人間環境学府には、筆者の修士論文をまとめるにあたり、研究方法の初歩から、研究の方向、内容、展開、論文の執筆に至るまで、先生のオフィスに掛けてあったホワイトボードに一から懇切丁寧に書きながら御指導して下さった先生の姿は今も忘れられません。先生の学問に対する真摯な姿勢と温かいお人柄は私の一生に大きな教訓として残ると思います。自分なりのやり方で、ものをよく見ること、そしてよく考えることの大切さを先生から学びました。先生には大学を移られた後、無理を言って京都大学防災研究所で先生のもとに引き続き勉強させて頂いた以来も、相変わらず、自由な研究環境と、多大なるご指導、ご鞭撻を頂きました。国際会議での研究発表、国内学術発表会への参加、数多くの構造物実測調査や地震被害調査、三次元振動台での実験において貴重な経験をさせて頂きました。さらに若手研究者等海外派遣、研究費や奨学金申請などにも積極的に推薦されまして、RA などの学内のアルバイト機会を与えてくださったことで、最短修業年限過者であるものでもあります博士課程を本当に有意義に過ごしました。博士論文をまとめるにあたり、個人的な限界があり、決定した時期に提出すべき研究内容を完成できず、なかなか研究が進まない自分に何があっても絶えず熱心で適確なご指導を頂きました。川瀬先生が指導教官でなかったら、今の私は存在しなかったと思っております。本論文に関する一連の研究について懇切丁寧な御指導と共に、研究全般にわたる貴重なご意見を頂きました。私の学位論文は大きく分けて、強震動予測、建物被害予測及び震災をもたらす環境負荷の評価との 3 つに分けることが出来ます。これらは先生の元教え子、九州大学元川瀬研究室の諸先輩方の成果をご参考もしくはお応用したのですが、これまで研究室に積み重ねられた成果は大変有益なものであると感じました。川瀬先生、諸先輩方に深く感謝を記すと共に、筆者の地中での震源モデルの作成から、地盤での強震動予測、地表での建物被害予測、そして被害をもたらす環境負荷の評価にかけての一連の研究成果もこれからの都市防災研究に少しでも役に立てれば、幸いです。

京都大学教授 中島正愛先生、清野純史先生には、学位論文の審査にあたっては、ご多忙の中、貴重な時間を割いて頂き、研究内容についてご指導を頂くとともに、今後の研究の方向性についても貴重なご示唆を頂きました。ここに記して深甚な感謝の意を表しますとともに、深く御礼申し上げます。

京都大学防災研究所准教授 松島信一先生には、研究室で身近な存在として厳しくも暖かいご指導、ご鞭撻を頂きました。先生から習ったのは専門的知識だけではなく、日常の生活に関して日本語や日本の文化・習慣についてもいろいろなことをお教えて頂きました。また、個人の限界というものがあり、この 5 年間で発表した論文に関して、私の未熟な日本語を添削して頂いた他、理論について理解が不十

分な点を分りやすくご指導して頂きました。いつも論文や梗概のメ切直前のご修正をお願いしても絶えず最後まで熱心で適確なご指導を頂いたことに感謝の気持ちでいっぱいです。家族を連れている留学生ということで家族のことや日常習慣などが分からなくて困ったことに関して的確にアドバイスを頂くなど、先生のリードや支えなくしては今の私や研究、そして本論文の遂行することが不可能と思っております。ここに記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

京都大学教授 寶馨先生、釜江克宏先生、京都大学准教授 畑山満則先生、京都大学助教 川辺秀憲先生、浅野公之先生には、多大な謝意を表します。寶先生が拠点リーダーとなった GCOE プログラムの一環の若手研究者等海外派遣に 2 回ほど採用されて、内モンゴル師範大学 那仁満都来博士のところに行って直接ご指導を頂きました。釜江先生、川辺先生の想定東南海地震の震源モデルのパラメーターを参考にして不均質震源モデルを用いて想定東南海地震の広周期帯域の強震動予測致しました。畑山先生には GISIS による市町村における環境負荷量分布図の出力をお教えて頂きました。浅野先生には東方地方太平洋沖地震の震源モデルパラメーターを提供して頂きました。本研究では用いていませんか本研究の強震動予測方法の検証に参考させて頂きました。また、京都大学大学院建築学専攻建築構造セミナー、防災研究所の研究発表講演会や総合防災グループ合同ゼミ合宿などの場を通して、多くの先生方より多面的な観点から貴重なご助言を得て、狭くなりがちな私の視野を広げて下さいました。ここに記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

竹中工務店設計本部設計企画部専門役 前野敏元氏には、同じ川瀬・松島研究室の一人として研究室の全体ゼミや建築学専攻建築構造セミナーなどの場を通して、研究内容についてご指導を頂くとともに、貴重なご意見を頂きました。また、研究に対する姿勢・考え方で多くのことを学ばせて頂きました。工学研究科建築学専攻建築構造セミナー後の食事にもいつも一緒にさせて頂き、大なるご支援、ご馳走になりました。ここに記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

清水建設技術研究所 佐藤智美博士、早川崇氏、大島光貴博士には、多大な謝意を表します。東方地方太平洋沖地震における現地の被害調査では一緒にさせて頂き、貴重な経験や大変勉強になりました。また、佐藤博士には本研究の第 2 章に使用して頂きました東方地方太平洋沖地震の震源モデルのパラメーターを提供して頂き、その強震動再現に関して貴重なご助言を頂きました。早川崇氏の発表しました論文には共同著者としてさせていただきました。ここに記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

内モンゴル師範大学の那仁満都拉博士には、本論文をまとめるにあたり、貴重な時間を割いて頂き、強震動予測について全般にわたり直接具体的にご指導、ご鞭撻を頂きました。本研究には、南海地震を対象に、想定南海地震の予測強震動、建物被害予測、時系列被害予測とその環境負荷評価への応用に関する先駆的な研究をされてきた那仁満都拉博士の研究を発展させ、東海地震・東南海地震、南海地震の連動地震も含めたフィリピン海プレート巨大海溝型地震による強震動および建物被害の予測とその対応策を提案致しました。那仁満都拉博士には、巨大海溝型地震による強震動予測・構造物被害予測、特に地震被害による環境負荷の評価については、その評価法の詳細を直接ご指導頂きましたことは、本研究の最終部分の仕上げをより高度なものにするのに大いに役に立ったものと思います。同郷人、そして中国での同じ大学を卒業、留学先でも同じ研究室の先輩として、日本での留学中に生活面、学業面などのすべてに対して大変お世話になりました。ここで記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

川瀬・松島研究室の秘書である矢野佐永子さん、派遣社員の伊藤晴子さんには、研究活動や就職に関わる事務手続きなどにご協力頂くとともに、過ごしやすい研究環境を与えて頂きました。心より深く感

謝申し上げます。京都大学技術職員 山崎友也氏、派遣社員の岡田達司氏には、筆者の文部科学省の先端研究施設共用促進事業「強震応答実験装置を用いた構造物の耐震性能把握手法の確立」での技術指導補助者（RA）に採用されて以来、特定研究員（研究開発施設共用）として採用されている現在でも、川瀬・松島研究室の管理している三次元振動台での行った各種実験においては一緒にさせて頂き、実験の計画、実験体の組立、データの計測設定および整理に至るまで、ご丁寧に分かり易くお教えて頂きまして、貴重な経験・大変勉強になりました。ここで記して深く感謝するとともに厚く御礼申し上げます。

同じ川瀬・松島研究室のメンバー、修了、卒業された方々には、多大な謝意を表します。本論文の第2章の耐震補強の有効性に関する実証的検討のために行った微動計測にご協力頂くとともに、日常生活に関しても日本語や日本の文化・習慣についてもいろいろなことをお教えて頂きました。また、孤独になりがちな研究活動に様々な刺激を与えて頂くとともに、過ごしやすい研究環境を与えて頂きました。皆様の今後のご活躍を心よりお祈り申し上げます。

さらに、ここに書ききれなかった方々を含め、日本での留学中に会った友人達、お世話になった全ての方々、研究助成・奨学金を受給された文部科学省、学生支援機構、京都大学、関西エネルギー・リサイクル科学研究振興財団、岩谷直治記念財団の関係者に心より深く感謝の意を表し、謹んで厚く御礼を申し上げます。

最後に、このような日本の大学での勉学・研究が行える教育を与えてくれた両親、超長期に渡る学生生活を理解しながら支え、励ましてくれた妻の敖敦格日樂（オドンゲルラ）、いつも最高の笑顔で筆者に接してくれる長男の阿吉満来（アジマンライ）に心から感謝いたします。

2014 年 1 月 京都にて

ぼ い ん と
宝 音 図

なお、本博士学位論文の印刷製本は平成 25 年度総長裁量経費「若手研究者の論文出版支援事業」による助成を受けて実施しました。関係者に謹んで厚く御礼を申し上げます。